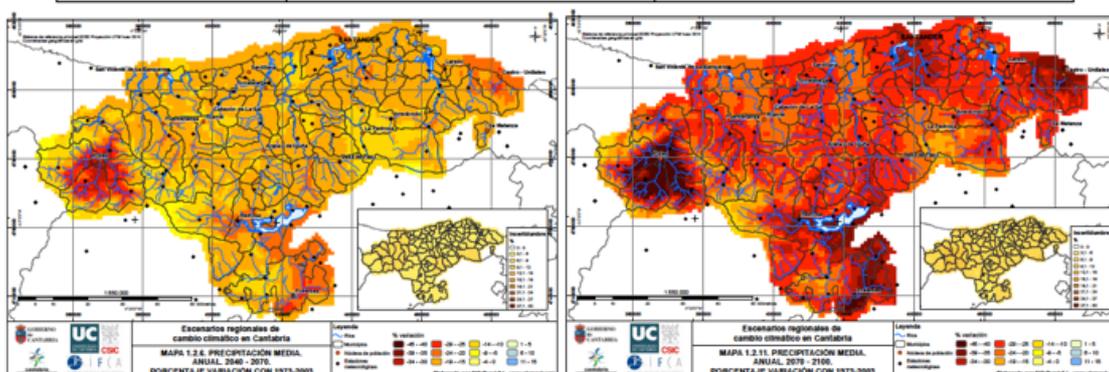
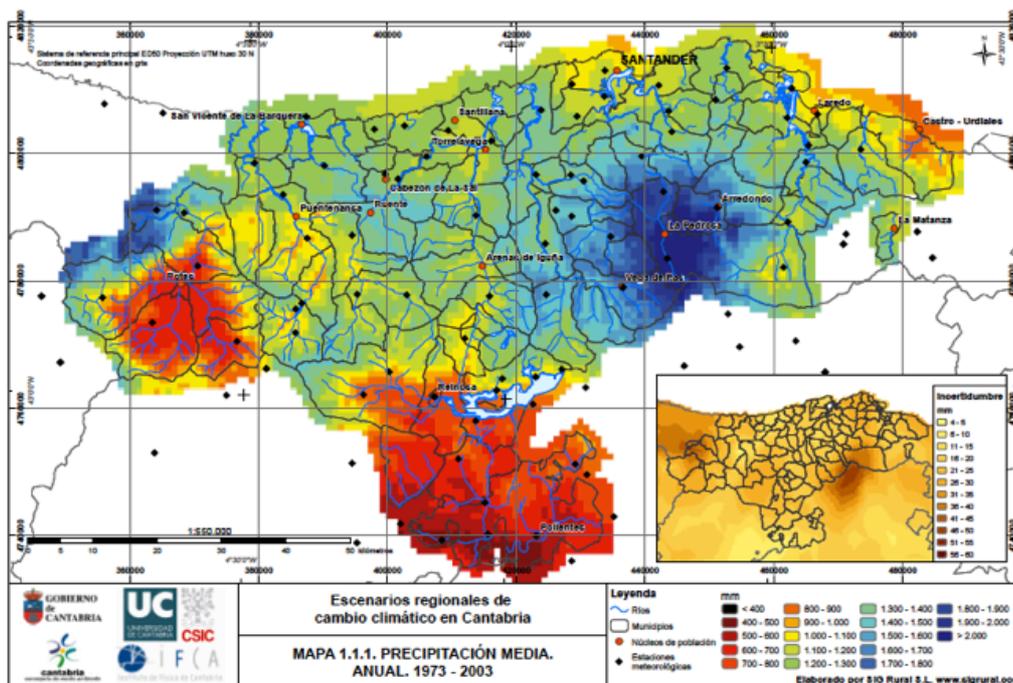




Escenarios Regionales Probabilísticos de Cambio Climático en Cantabria: Termopluviometría

J.M. Gutiérrez, S. Herrera, D. San-Martín, C. Sordo, J.J. Rodríguez, M. Frochoso, R. Ancell, J. Fernández, A.S. Cofiño, M.R. Pons, M.A. Rodríguez



(Santander, 2010)

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos.....	1
Presentación, Organización y Equipo Investigador	3
CAPÍTULO 1	5
Antecedentes: Cambio Climático Global y Regional	
1.1. El Cambio Climático Global.....	5
1.2. Escenarios Globales de Cambio Climático. Incertidumbres	6
1.3. Escenarios Regionales de Cambio Climático.....	8
1.4. Regionalización Dinámica	10
1.5. Regionalización Estadística	10
1.6. Situación de la Regionalización en España	11
CAPÍTULO 2	17
Climatología de Cantabria: Termopluviometría de 1950-2000	
2.1. Introducción.....	17
2.2. Las Redes de Observación. Antecedentes en Cantabria.....	17
2.3. El Clima de Cantabria	19
2.4. Termopluviometría de Cantabria	20
2.4.1 Termometría de Cantabria.....	21
2.4.2 Pluviometría de Cantabria	22
CAPÍTULO 3	29
Series Mensuales de Referencia para Santander y Reinosa en el S. XX	
3.1. Introducción.....	29
3.2. Series de Referencia para Precipitación: Datos y Metodología	30
3.3. Serie de Referencia de Precipitación para Santander	33
3.4. Serie de Referencia de Precipitación para Reinosa.....	35
3.5. Series de Referencia para Temperaturas: Datos y Metodología	37
3.6. Serie de Referencia de Temperaturas para Santander.....	38
3.7. Serie de Referencia de Temperaturas para Reinosa.....	41
CAPÍTULO 4	45
Climatologías Interpoladas de Alta Resolución: 10 km y 1 km	
4.1. Introducción y Datos Utilizados	45
4.2. Interpolación a la Rejilla de 10 km: Kriging	49
4.2.1 Estimación de la Incertidumbre Asociada.....	50
4.3. Interpolación a la Rejilla de 1 km: Regresión con Covariables	51
4.4. Climatologías Anuales a las Distintas Resoluciones	53
4.5. Climatologías Mensuales	54

CAPÍTULO 5	63
Escenarios Globales de Cambio Climático	
5.1. Introducción.....	63
5.2. Análisis Global en el Mediterráneo Occidental	64
5.3. Proyecciones Globales para Cantabria	67
CAPÍTULO 6	69
Regionalización Dinámica: Modelos Regionales del Clima	
6.1. Introducción.....	69
6.2. Climatologías de los Modelos Regionales.....	71
6.3. Proyecciones Regionales para Cantabria	74
6.4. Impacto de la Resolución Horizontal	77
CAPÍTULO 7	79
Regionalización Estadística	
7.1. Introducción.....	79
7.2. Técnicas de Downscaling Estadístico Empleadas.....	80
7.3. Variabilidad de los Tipos de Tiempo	83
7.4. Robustez de las Técnicas Estadística en Clima Futuro	85
7.5. Comparación de Observaciones y Proyecciones en un Período de Control.....	87
7.6. Proyecciones Regionales de Alta Resolución (1 km) para Cantabria.....	93
Conclusiones	99
Distribución de Datos: NetCDF, Soporte SIG y Portal Web	101
Referencias	103
Anexo 1. Escenarios de Alta Resolución	107

Presentación, Organización y Equipo Investigador

La **Estrategia de lucha frente al Cambio Climático de Cantabria, 2008-2012**, es el marco de actuación para la mitigación y adaptación frente a este problema global en el ámbito de nuestra Comunidad (ver <http://www.cambioclimaticocantabria.es>). En dicho documento se detallan las medidas concretas para hacer frente al problema, con desglose temporal y competencial, dentro del ámbito organizativo regional. El desarrollo del trabajo para la realización de los Escenarios Regionales de Cambio Climático, cuyos resultados se describen en este libro, se enmarca dentro de las medidas de actuación contenidas en la Estrategia Regional de lucha frente al Cambio Climático, como una actuación prioritaria dentro del área de adaptación al Cambio Climático, orientada a identificar los efectos en el clima de nuestra Comunidad, y poder con esta base, planificar medidas concretas de adaptación coste-eficientes.

Así, en el proyecto "Generación de Escenarios Regionales de Cambio Climático en Cantabria", financiado por la Consejería de Medio Ambiente del Gobierno de Cantabria y realizado durante el período 2008-2009, se planteó como objetivo principal la caracterización del régimen termopluviométrico en la región a alta resolución (1 km) y su proyección futura según distintos escenarios de cambio climático a lo largo del siglo XXI (2011-2040, 2041-2070, y 2071-2100). Para ello se utilizaron técnicas de regionalización (downscaling) para proyectar las proyecciones globales de los modelos del cuarto informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático IPCC (IPCC-AR4) y para cuantificar la incertidumbre. No obstante, también se analizaron de manera preliminar otros aspectos novedosos, como la regionalización del clima marítimo (no descritos en el presente manuscrito). Los productos y datos resultantes de este trabajo, así como información adicional sobre su uso se encuentran disponibles en: <http://www.meteo.unican.es/escenariosCantabria>.

Como primer paso, tras analizar las características del clima en Cantabria y sus tendencias en el siglo pasado (Capítulos 2 y 3), se construyó una rejilla de alta resolución (1 km) interpolando las observaciones homogéneas disponibles en la región (Capítulo 4), que sirvió de base para validar los resultados de los modelos globales (Capítulo 5) y regionales (Capítulo 6) del clima, así como para la proyección regional utilizando técnicas de regionalización estadística (Capítulo 7). Estas técnicas permiten combinar de forma empírica las simulaciones globales del clima con la información observada de alta resolución (en este caso la climatología a 1 km sobre Cantabria). De esta forma se obtienen modelos estadísticos de transferencia que permiten estimar el clima de alta resolución a partir del valor simulado a baja resolución por los modelos globales. Esta metodología ha constituido la tarea principal del proyecto, de cara a proporcionar escenarios regionales de cambio climático de alta resolución bajo distintos escenarios de emisión y distintos modelos globales.

No ha sido un objetivo de este estudio desarrollar nuevas técnicas estadísticas ni dinámicas (modelos regionales del clima), sino adaptar las técnicas ya existentes a los condicionantes geográficos y climáticos particulares de nuestra región. Tampoco ha sido un objetivo de este proyecto realizar estudios de atribución ni de variabilidad climática. Se prevé que estas tareas serán abordadas a escala nacional en el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático y, por tanto, supondrían una duplicidad de esfuerzos. Asimismo, en este trabajo se ha aprovechado la experiencia previa de distintos proyectos, tratando de aglutinar las distintas bases de datos de observaciones disponibles en nuestra región y las bases de datos de simulaciones globales y regionales desarrolladas en proyectos como ENSEMBLES (el informe final de este proyecto se puede obtener en <http://ensembles-eu.metoffice.com>). Para no duplicar esfuerzos se han tratado de coordinar al máximo las actividades con el "Programa coordinado para generación de escenarios regionalizados de cambio climático" del Ministerio de Medio Ambiente.

El equipo de investigación está formado por investigadores de la Universidad de Cantabria:

G1. Grupo de Meteorología

IFCA (CSIC-UC)

Dr. José M. Gutiérrez (responsable)
Dr. Miguel Ángel Rodríguez
D. Sixto Herrera
D. Daniel San Martín

Dpto. de Matemática Aplicada y C.C.

Dr. Jesús Fernández (responsable)
Dr. Carmen María Sordo
Dr. Antonio S. Cofiño

G2. Grupo de Investigación en Estudio y Gestión del Medio Natural:

Dr. Domingo Fernando Rasilla (responsable)
Dr. Juan Carlos García

G3. Grupo de Investigación en Geografía Histórica del Paisaje:

Dr. Manuel Frochoso (responsable)
D. Juan José Rodríguez
D. Amaro Cayón

G4. Instituto de Hidráulica de Cantabria, IHC:

Dr. Fernando Méndez (responsable)	Dr. Paula Camus
Dr. Raúl Medina	Dña. Cristina Izaguirre
Dr. Iñigo Losada	D. Antonio Espejo
Dr. Melisa Menéndez	D. Borja Reguero

Además, el proyecto ha contado con la colaboración desinteresada de:

G5. Agencia Estatal de Meteorología (Delegación en Cantabria):

Dr. Rafael Ancell (responsable)
Dña. María Rosa Pons



Con la colaboración de:



El investigador Responsable del Proyecto:

Dr. José Manuel Gutiérrez Llorente,
Profesor de Investigación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
Instituto de Física de Cantabria, IFCA (CSIC-UC).
Grupo de Meteorología. Universidad de Cantabria
manuel.gutierrez@unican.es
<http://www.meteo.unican.es>

CAPÍTULO 1

Antecedentes: Cambio Climático Global y Regional

Grupo Responsable:
Grupo de Meteorología (Instituto de Física de Cantabria, CSIC-UC)
manuel.gutierrez@unican.es

1.1. El Cambio Climático Global

El Cambio Climático Global (CCG) es una de las principales preocupaciones para la sostenibilidad futura de nuestro desarrollo dado su impacto en numerosos sectores socio-económicos de la actividad humana. En las últimas décadas se ha llevado a cabo un enorme esfuerzo tecnológico e investigador para explicar las posibles causas de este fenómeno y para tratar de predecir su tendencia futura. Este conocimiento es de vital importancia para tomar medidas preventivas de mitigación y de adaptación a través de la adecuada planificación de las actividades socio-económicas futuras que se puedan ver afectadas.

Las observaciones y estudios realizados hasta la fecha han permitido constatar un calentamiento global del planeta: los doce años más calurosos registrados desde 1850 han ocurrido en los últimos 13 años; por otra parte, se ha registrado un aumento de la temperatura media de la superficie de 0.74 °C en los últimos 100 años. Además de este calentamiento global, también se ha constatado el incremento de condiciones extremas que se traducen en olas de calor, sequías, inundaciones, etc. (ver Stott et al. 2004), y su incidencia en la salud humana (Patz et al. 2005). También se ha conseguido explicar el origen antropogénico del cambio debido, principalmente, al incremento de emisiones de gases de efecto invernadero (ver, por ejemplo, Stott et al. 2001) y se han obtenido proyecciones globales de la tendencia futura de estos cambios utilizando modelos físico-matemáticos del clima (modelos globales del clima, GCM según sus siglas en inglés). Estos modelos simulan en un ordenador la dinámica del sistema climático (atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera y biosfera) bajo distintos *escenarios socio-económicos* que caracterizan la evolución futura de los factores que afectan al sistema climático, incluidos los factores antropogénicos como la emisión de gases de efecto invernadero (ver Nakicenovic et al. 2001, para más detalles sobre escenarios de emisión).

La actividad científica sobre el CCG está coordinada a nivel internacional por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC en sus siglas inglesas), que está organizado en tres grupos de trabajo: el Grupo I estudia los aspectos científicos, el II los impactos y adaptaciones al cambio climático y el III las posibles opciones para mitigar este cambio. El último informe de este organismo ha sido presentado en 2007, IPCC-AR4 (Fourth Assessment Report, AR4), y puede consultarse en <http://www.ipcc.ch>. Estos informes constituyen la referencia obligada de los estudios de cambio climático pues recopilan los resultados científicos publicados más relevantes sobre el tema¹. La fuente principal de información para estos informes son las proyecciones del clima futuro obtenidas a partir de las simulaciones de distintos GCMs para distintos escenarios socio-económicos futuros hipotéticos. Este conjunto de simulaciones son llevadas a cabo por centros de investigación de referencia de todo el mundo y permiten estimar la variación decadal de variables como la temperatura o la

¹ El informe de síntesis elaborado para la conferencia COP15 de Naciones Unidas para Cambio Climático celebrada en Copenhague en diciembre de 2009 es la referencia más actualizada sobre cambio climático global hasta la fecha, http://climatecongress.ku.dk/pdf/Synthesis_Report_-_Spanish_-_ISBN.pdf

precipitación a lo largo del siglo XXI, y también estimar su incertidumbre (ver Murphy et al. 2004, ver también la documentación del proyecto "Coupled Model Intercomparison Project, CMIP", <http://www-pcmdi.llnl.gov/projects/cmip>).

El conocimiento del sistema climático y de los factores responsables del CCG, junto con los resultados globales obtenidos por los GCM permiten definir políticas conjuntas de *mitigación* para tratar de frenar este problema en el futuro. Sin embargo, las políticas de *adaptación* al cambio climático requieren una previsión detallada de dicho cambio, que tenga en cuenta las heterogeneidades regionales y que permita analizar la magnitud de los posibles *impactos locales* en los ecosistemas, la agricultura, la hidrología, etc. Los modelos globales del clima no proporcionan este nivel de detalle y, por tanto, es necesario realizar un esfuerzo adicional para obtener *escenarios regionalizados de cambio climático*. Este problema ha cobrado un fuerte interés en los últimos años y es uno de los objetivos prioritarios de los últimos proyectos de cambio climático, así como del último informe del IPCC, y de los distintos gobiernos, para poder llevar a cabo estudios de impacto y planes de adaptación adecuados.

1.2. Escenarios Globales de Cambio Climático. Incertidumbres

Los Modelos Globales del Clima (*GCMs* en inglés) son modelos físico-matemáticos de las ecuaciones fundamentales que describen la dinámica de los procesos globales que tienen lugar en la atmósfera, el océano, la criosfera y la litosfera, considerando las variables necesarias para describir el estado del sistema: presión, temperatura, velocidad, humedad atmosférica, salinidad oceánica, etc. Además de la dinámica, los modelos también incluyen ciertas parametrizaciones semi-empíricas que tienen en cuenta procesos de escala menor que la resolución del modelo que no se consideran explícitamente en la dinámica del sistema. Estos complejos modelos se utilizan para simular el clima global resolviendo numéricamente las ecuaciones, a partir de una condición inicial, sobre una rejilla discreta de puntos que cubre todo el globo (con una resolución típica de 250 km y 30 niveles verticales para la atmósfera²); las simulaciones climáticas se realizan para largos períodos de tiempo, conformando períodos de referencia que sirvan para definir estadísticamente los valores meteorológicos normales³.

A lo largo de estas simulaciones climáticas el sistema está forzado por la composición cambiante de la atmósfera (concentración de gases de efecto invernadero, etc.), que es conocida para períodos de referencia como 1970-2000. Sin embargo, para simular la evolución futura del clima es necesario estimar cuál será la evolución de los distintos forzamientos del sistema en el futuro (forzamientos naturales, emisiones de gases, etc.). Como esta evolución depende de distintos factores socio-económicos, es necesario utilizar un conjunto de posibles "escenarios de emisiones", que tengan en cuenta esta incertidumbre. Por tanto, la simulación de escenarios de cambio climático se caracteriza por la presencia de distintas fuentes de incertidumbre que afectan a todos los pasos del proceso, desde el establecimiento de escenarios de emisión, hasta el propio error de modelización de los GCM (especialmente las parametrizaciones). Estas incertidumbres se pueden describir en forma jerárquica o de cascada (Mitchell y Hulme, 1999; Murphy *et al.* 2004):

- En el vértice de las incertidumbres se sitúan los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero, que influyen en el forzamiento natural del sistema, según distintas

² La limitada resolución espacial de los modelos globales es debida tanto a factores computacionales (tiempo de cálculo), como a factores físicos (parametrización de los procesos sub-rejilla). La Tabla 1.1 muestra las características de los distintos modelos, incluyendo la resolución, que oscila entre 150 y 400 km.

³ Obsérvese que las proyecciones de cambio climático se refieren a cambios a escalas decadales en respuesta al forzamiento de los gases de efecto invernadero según el escenario, y no tienen ninguna validez para la predicción a escalas intra-decadales.

hipótesis sobre las futuras formas de desarrollo socio-económico (escenarios B1, A2, A1B, ver Nakicenovic *et al.* 2001).

- A esta incertidumbre hay que añadir las asociadas al efecto de estos gases y otros componentes (aerosoles, etc.) en la dinámica del sistema (ciclo del carbono, etc.).
- Por otro lado, los diferentes modelos climáticos existentes son formulaciones similares de las ecuaciones que describen la dinámica atmosférica y oceánica, pero tienen distintas resoluciones horizontales y verticales, esquemas numéricos, parametrizaciones de procesos físicos, etc. También añaden incertidumbre a los resultados de los modelos otros subsistemas del modelo climático, como las variaciones en usos de suelo, etc.

Para tener en cuenta estos factores en la generación de proyecciones de cambio climático para periodos futuros (por ejemplo, para final de siglo 2080-2100), se utilizan metodologías que permiten muestrear las fuentes de la incertidumbre y cuantificar su magnitud (por ejemplo, mediante un intervalo de confianza). Para abordar este problema se recurre a una aproximación probabilística, utilizando la metodología de predicción por conjuntos (*ensemble forecast*, en inglés), en la que se explora un conjunto representativo de modelos, emisiones, etc., obteniendo un conjunto de predicciones multi-modelo que ha de ser analizado con técnicas estadísticas adecuadas para poder proporcionar proyecciones junto con la incertidumbre asociada (ver Collins 2007 para más detalles). Por ejemplo, los resultados del IPCC-AR4 se han obtenido a partir de las simulaciones de más de 20 modelos globales cuyas características se muestran en la Tabla 1.1 (ver Randall *et al.* 2007, <http://www-pcmdi.llnl.gov>). Este conjunto de simulaciones permite obtener proyecciones globales futuras de variables climáticas como la temperatura o la precipitación y también estimar la incertidumbre de las mismas (ver Murphy *et al.* 2004).

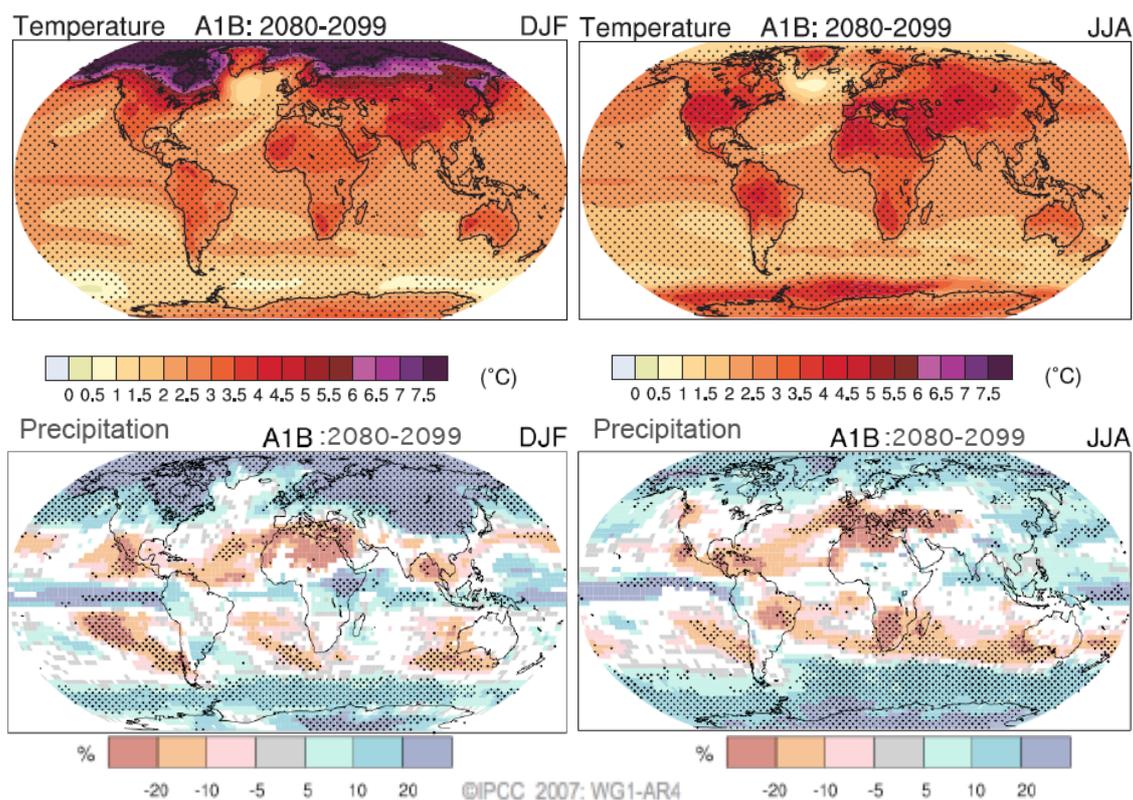


Figura 1.1. Proyecciones de incremento de temperatura (en °C, fila superior) y precipitación (en %, fila inferior) según el multi-modelo del IPCC-AR4 para invierno (columna izquierda) y verano (columna derecha); ver Tabla 1 para detalles sobre las características de los modelos. Los puntos de rejilla cuya variación es significativa se muestran marcados con un punto (FUENTE: IPCC 2007: WG1-AR4, Randall *et al.* 2007).

Por ejemplo, como muestra la Figura 1.1, las proyecciones del multi-modelo IPCC-AR4 para temperatura y precipitación a final del siglo (período 2080-2100) muestran un aumento global de la temperatura significativo en casi todo el globo (se definen como significativos aquellos puntos de rejilla donde el incremento promedio del multi-modelo es mayor que la desviación estándar del mismo; es decir, la magnitud del cambio es mayor que su incertidumbre). Por otra parte, también se muestran evidencias de una disminución de precipitación en algunas zonas del globo como, por ejemplo, el área Mediterránea.

1.3. Escenarios Regionales de Cambio Climático

Los modelos globales proporcionan una valiosa información sobre las variaciones previstas para el futuro, como efecto de los distintos escenarios de cambio climático, en variables como la temperatura y la precipitación sobre grandes regiones del globo, como Europa o el Mediterráneo. Sin embargo, dada su limitada resolución espacial (ver Tabla 1.1), los escenarios resultantes no permiten realizar un análisis regional detallado (por ejemplo en la Península Ibérica, donde los modelos tienen un promedio de 16 puntos de rejilla). Por tanto, los escenarios globales no permiten analizar la magnitud de los posibles impactos locales en los ecosistemas, la agricultura, la hidrología, etc., ya que no tienen en cuenta la heterogeneidad regional del clima, particularmente en zonas de orografía compleja, que puede dar lugar a fuertes variaciones locales de temperatura y precipitación, configurando un complejo mosaico de micro-climas. Por ejemplo, la Figura 1.2 muestra la orografía de Cantabria, que está contenida en un único punto de rejilla de un modelo global típico, pero donde coexisten distintos climas (ver Capítulo 2 para más detalles) que los modelos globales no pueden diferenciar.

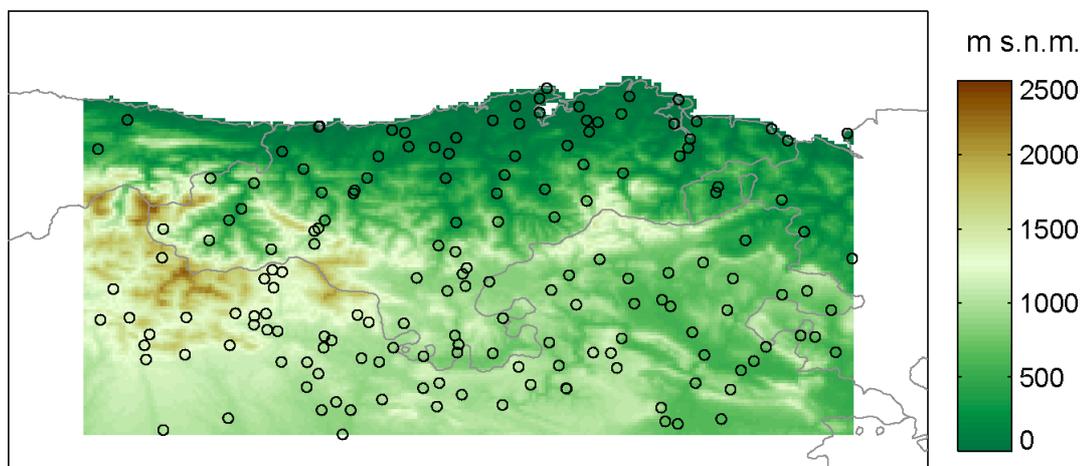


Figura 1.2. Orografía de Cantabria interpolada a una resolución de 1km. Los círculos muestran los observatorios de AEMET donde se dispone de registros históricos de observaciones diarias.

Por tanto, es necesario realizar un esfuerzo adicional para obtener escenarios regionalizados de cambio climático. Este problema, que se denomina genéricamente *downscaling* (aumento de resolución), ha cobrado un fuerte interés en los últimos años, siendo uno de los objetivos prioritarios de las diferentes iniciativas internacionales y nacionales de cambio climático, para poder disponer de la información necesaria para poder llevar a cabo estudios de impacto y planes de adaptación adecuados. Las dos metodologías complementarias que se aplican en este problema son (ver Gutiérrez et al. 2004; Goodess et al. 2009, para más detalles):

- La *regionalización dinámica* utiliza modelos regionales del clima con una resolución mayor (hasta 25km en el proyecto europeo ENSEMBLES) que operan en una región limitada acoplados a las condiciones de contorno dadas por los modelos globales.
- La *regionalización estadística* utiliza modelos estadísticos empíricos para "calibrar" los resultados globales en función del clima local observado, dado por un registro histórico apropiado representativo de la región.

La Figura 1.3 muestra un esquema ilustrativo de estas dos metodologías, cada una de las cuales tiene sus ventajas y sus limitaciones, pero que resultan complementarias para los estudios de regionalización; por ejemplo, en la literatura existen numerosos casos de estudio en los que se muestra que ninguna de estas metodologías es superior a la otra, sino que en cada caso unas técnicas son más apropiadas que otras (ver, por ejemplo, el exhaustivo estudio realizado en Murphy 2000, considerando 976 estaciones Europeas).

A nivel europeo, el problema de la regionalización de cambio climático ha sido tratado en distintos proyectos Europeos utilizando modelos regionales dinámicos (PRUDENCE, <http://prudence.dmi.dk>), estadísticos (STARDEX, <http://www.cru.uea.ac.uk/projects>), o combinando ambos (ENSEMBLES, <http://ensembles-eu.metoffice.com/> 2004-2009). En este último proyecto se ha elaborado una metodología probabilística de regionalización, considerando multi-modelos, multi-escenarios y multi-técnicas de downscaling, que constituye un referente actual para este tema, y que ha sido aplicada para la realización del presente proyecto (ver van der Linden and Mitchell, 2009; Goodess, Gutiérrez, et al. 2009).

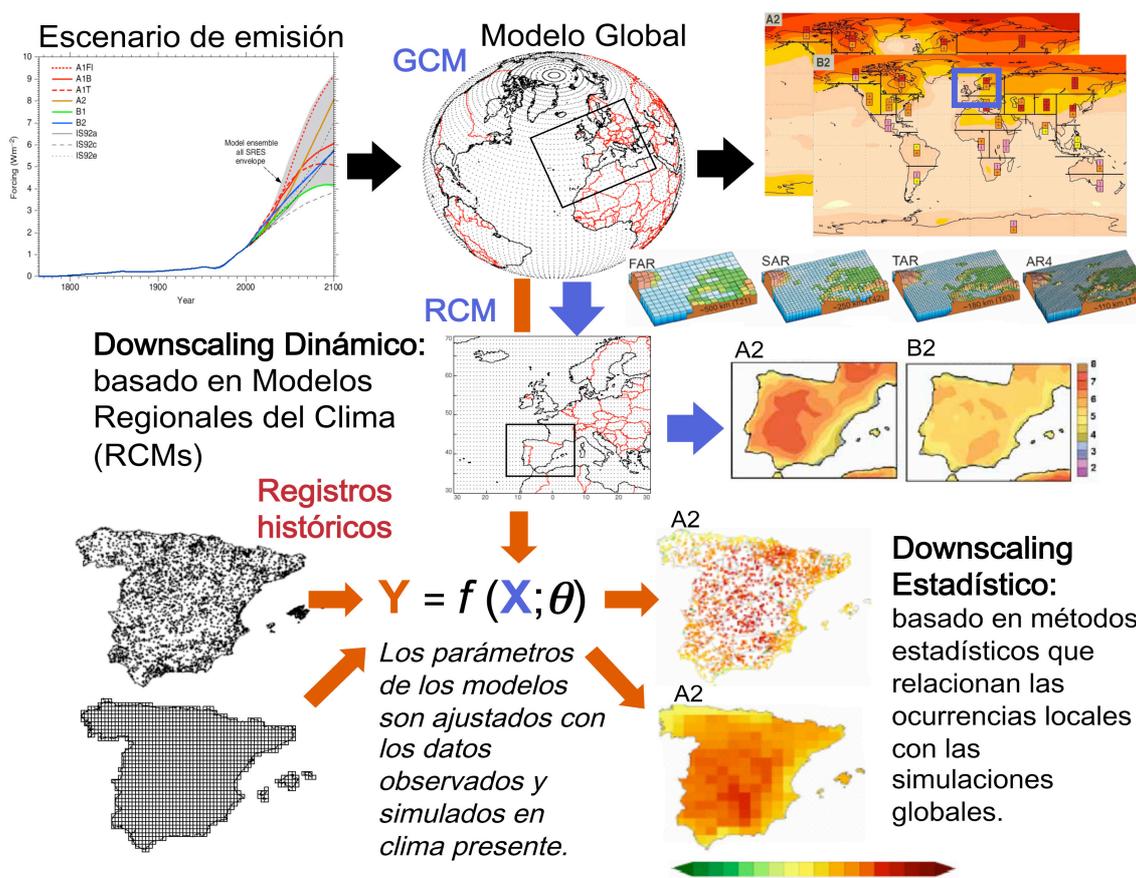


Figura 1.3. Esquema ilustrativo de las metodologías de regionalización dinámica y estadística.

1.4. Regionalización Dinámica

Las técnicas de regionalización dinámica se basan en el uso de modelos regionales o de área limitada (RCM, del inglés Regional Climate Model). Para aumentar la resolución de los modelos climáticos globales se “anida” un modelo regional de mayor resolución en el interior del modelo global, únicamente en la zona de interés (ver Figura 1.3). El modelo regional toma como condiciones de contorno los valores del modelo global a lo largo de toda la integración (Giorgi y Mearns, 1999; Leung *et al.* 2003). Las técnicas dinámicas tienen la ventaja de ser físicamente consistentes y la desventaja de necesitar una gran capacidad de cálculo, lo que limita actualmente las simulaciones a resoluciones de unos 25 km.

En el marco del proyecto Europeo ENSEMBLES se ha llevado a cabo un conjunto de simulaciones regionales, anidando 10 RCMs con una resolución de 25 km en distintos modelos globales de circulación, considerando simulaciones de clima presente (1950-2000) así como simulaciones de un escenario futuro (2000-2100, escenario A1B). De esta manera se puede “separar” la variabilidad debida a los modelos globales y a los modelos regionales, y entender mejor este tipo de regionalización (ver <http://ensemblesrt3.dmi.dk/> para más detalles).

Por otra parte, dentro de las actividades de la WCRP (World Climate Research Program), se está diseñando una “Task Force on Regional Climate Downscaling” para producir escenarios regionales uniformes en todos los continentes (utilizando los mismos GCMs, escenarios y RCMs) de cara a tener una información global regionalizada, contribuyendo así a los próximos informes del IPCC. Esta actividad de regionalización se ha venido desarrollando hasta la fecha de forma muy dispersa, mediante distintos proyectos de regionalización a escala continental con poca conexión y transferencia (http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/SF_RCMTerms.html).

1.5. Regionalización Estadística

Estos métodos se basan en modelos que relacionan de forma empírica las variables de circulación (campos 3D) a gran escala, proporcionadas por los modelos numéricos de circulación global, con las variables locales/regionales observadas en superficie, relacionadas con el fenómeno de estudio (típicamente, la temperatura y la precipitación en superficie). Estos modelos se ajustan utilizando el clima presente (por ejemplo, un período de referencia de 30 años) y son utilizados posteriormente para proyectar las predicciones futuras suponiendo la estacionariedad del modelo (Wilby *et al.* 2004). La ventaja de estas técnicas es que utilizan la climatología real observada de la variable local de interés durante el período de referencia y, por tanto, calibran/corrigen estadísticamente las posibles deficiencias y desajustes sistemáticos de los modelos globales (debidos, por ejemplo, a la grosera representación de la orografía). Otra ventaja de estos métodos es que permiten incluir como predictores del método estadístico sólo aquellas variables de circulación que sean reproducidas con mayor fiabilidad por los modelos numéricos y que dependan en menor medida de parametrizaciones, que son ajustadas de forma semi-empírica en los modelos de circulación global y regional (por ejemplo, la precipitación depende en gran medida de numerosas parametrizaciones, y éstas también son ajustadas de forma semi-empírica introduciendo una mayor incertidumbre en las mismas). Por otra parte, las necesidades de cálculo de estas técnicas son menores que las requeridas para integrar modelos numéricos de circulación, si bien en algunos casos las técnicas estadísticas no lineales utilizadas consumen también muchos recursos de computación. Por tanto, se pueden utilizar los recursos computacionales para realizar un número adecuado de realizaciones/simulaciones con diferentes métodos de regionalización que cubran la variabilidad estadística de los resultados permitiendo obtener intervalos de confianza para las proyecciones finales y permitiendo también obtener medidas de calidad de los distintos métodos en las distintas regiones.

Las características anteriores hacen que la regionalización estadística se haya potenciado en los últimos proyectos de cambio climático, que incluyen tareas específicas a este respecto. Por ejemplo, en los proyectos Europeos ACCORD y STARDEX se compararon distintos métodos estadísticos sobre distintas regiones de Europa y para distintas variables concluyendo que ningún método es, en general, superior a los otros (Haylock *et al.*, 2006). Por tanto, es necesario considerar un conjunto amplio y robusto de métodos estadísticos para poder llegar a conclusiones basadas en conjuntos (o *ensembles*) que permitan cuantificar la incertidumbre introducida por el método de regionalización, que constituye otro elemento de incertidumbre en la cascada.

Las distintas técnicas de regionalización estadística que se han propuesto en la literatura se suelen clasificar en tres grupos (ver Gutiérrez *et al.* 2004 para más detalles):

- *Funciones de transferencia*, basadas en modelos de regresión lineales y no lineales para inferir las relaciones entre los predictandos locales y los predictores de larga escala. Estos métodos son “generativos”, en el sentido de que las predicciones se derivan de un modelo, que se obtiene a partir de los datos. En ocasiones se utilizan técnicas espaciales para reducir la dimensión del problema (Componentes Principales, etc.), o para predecir con patrones correlacionados (Correlación Canónica lineal o no lineal).
- *Tipos de tiempo y métodos de análogos*, basados en algoritmos de vecinos cercanos (k-NN) y/o en una preclasificación en un número finito de grupos (tipos de tiempo) obtenidos acorde a la similitud sinóptica de los campos; normalmente estos métodos son no generativos, pues se basan en un procedimiento algorítmico para obtener la proyección.
- *Generadores de tiempo*, que se utilizan cuando se dispone de predicciones a una escala temporal superior a la deseada (por ejemplo, mensual o estacional, cuando se necesita predicción diaria), y simulan estocásticamente series de valores diarios consistentes con la climatología prevista. Estos métodos son, en realidad, técnicas de desagregación temporal y tienen la ventaja práctica de permitir generar tantas realizaciones como se necesiten en el modelo de impactos que se aplique.

Como se verá más adelante, estas técnicas permiten reducir el error del modelo y adecuar las simulaciones a las climatologías locales definidas por las observaciones disponibles.

1.6. Situación de la Regionalización en España

Distintos países europeos están llevando a cabo programas nacionales de cambio climático para analizar los efectos de este problema a escala regional y así poder estudiar los impactos derivados en los distintos sectores socio-económicos y los distintos ecosistemas (Reino Unido <http://www.ukcip.org.uk/>, Portugal <http://www.siam.fc.ul.pt/siam.html>, Alemania, Irlanda, etc.). En lo que respecta a España, la compleja orografía y variedad climática, ilustrada en la Figura 1.5, hacen especialmente necesaria la existencia de un programa nacional de cambio climático, que pueda precisar las variaciones regionales esperadas en las distintas zonas climáticas, y permitir así realizar de forma apropiada los estudios de impactos relativos a la hidrología, la agricultura, los ecosistemas, el turismo, la salud, etc.

En el año 2005, la Oficina Española de Cambio Climático presentó el informe “*evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*” que resume las proyecciones de cambio climático disponibles para España en aquel momento, junto con una primera estimación de los impactos previsibles sobre distintos sectores productivos y ecosistemas naturales (el informe completo se puede descargar desde la Web http://www.mma.es/portal/secciones/cambio_climatico/areas_tematicas/impactos_cc/eval_impactos.htm).

Posteriormente, en el año 2006 el Ministerio de Medio Ambiente publicó el "*Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático*" http://www.mma.es/portal/secciones/cambio_climatico/areas_tematicas/impactos_cc/pnacc.htm, que establece el marco general de referencia para las actividades de evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático trabajando de forma coordinada entre la Administración Central y las Administraciones de las Comunidades Autónomas. Para realizar estas tareas es necesario un conocimiento detallado de las condiciones climáticas actuales, así como una estimación de las proyecciones climáticas futuras. Esta información puede considerarse la base sobre la que se levanta el Plan en su conjunto y, por tanto, las características relativas a su frecuencia de revisión y actualización y el grado de incertidumbre asociada a estos datos son factores clave de todo el proceso.

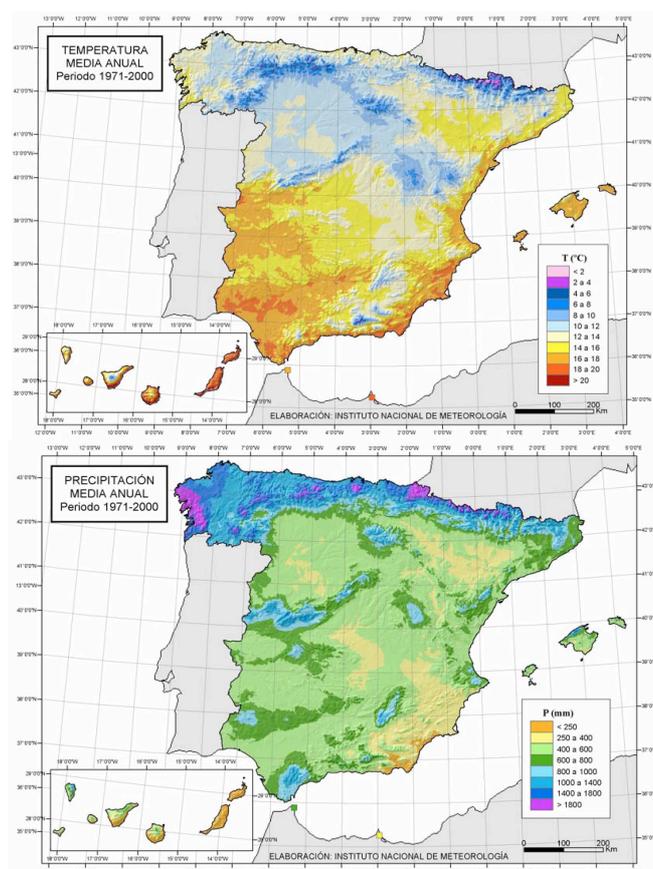


Figura 1.4: Temperatura (arriba) y precipitación (abajo) medias anuales para el periodo 1971-2000 (FUENTE: Agencia Estatal de Meteorología, AEMET).

En 2009 se publica un primer informe sobre escenarios de cambio climático a escala nacional, elaborado por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), la Fundación para la Investigación del Clima (FIC) y la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM). En este informe se aplica un modelo regional dinámico (el modelo PROMES) y dos métodos estadísticos para obtener un primer conjunto de escenarios regionales en España a partir de los modelos globales del IPCC-AR3, 2001. Se proporcionan resultados agregados anualmente a nivel de Comunidad Autónoma (ver Figura 1.5 para el caso de Cantabria), así como un conjunto de datos diarios con resolución regional (25 km) y local (en miles de puntos correspondientes a localidades con registros históricos), para el siglo XXI (http://www.aemet.es/es/elclima/cambio_climatico/escenarios). Este informe supone un “...punto de partida que se irá revisando y refinando sucesivamente mediante la utilización de los resultados más recientes de integraciones globales y la incorporación de técnicas de regionalización cada vez más perfeccionadas”.

Dentro de las acciones estratégicas de Energía y Cambio Climático (Plan Nacional de I+D+i, 2008-2011) se han aprobado dos proyectos de investigación coordinados por la Universidad de Cantabria (con la Univ. de Barcelona, Univ. de las Islas Baleares, Univ. de Zaragoza y FIC) y Universidad de Castilla La Mancha (con la Univ. de Murcia y Univ. de Cantabria), respectivamente, conducentes a actualizar los escenarios regionales a nivel nacional, partiendo de la información del IPCC-AR4, considerando un abanico mayor de métodos y modelos y analizando también las tendencias en indicadores y valores extremos de las distribuciones climáticas. Los resultados de esta acción estarán disponibles a partir del 2011.

En el presente proyecto se pretende dar un paso más y elaborar escenarios regionalizados de cambio climático para Cantabria a una resolución que tenga en cuenta sus particularidades climáticas. Estos escenarios serán utilizados por los distintos grupos de impactos para elaborar estudios detallados de impactos en distintos sectores.

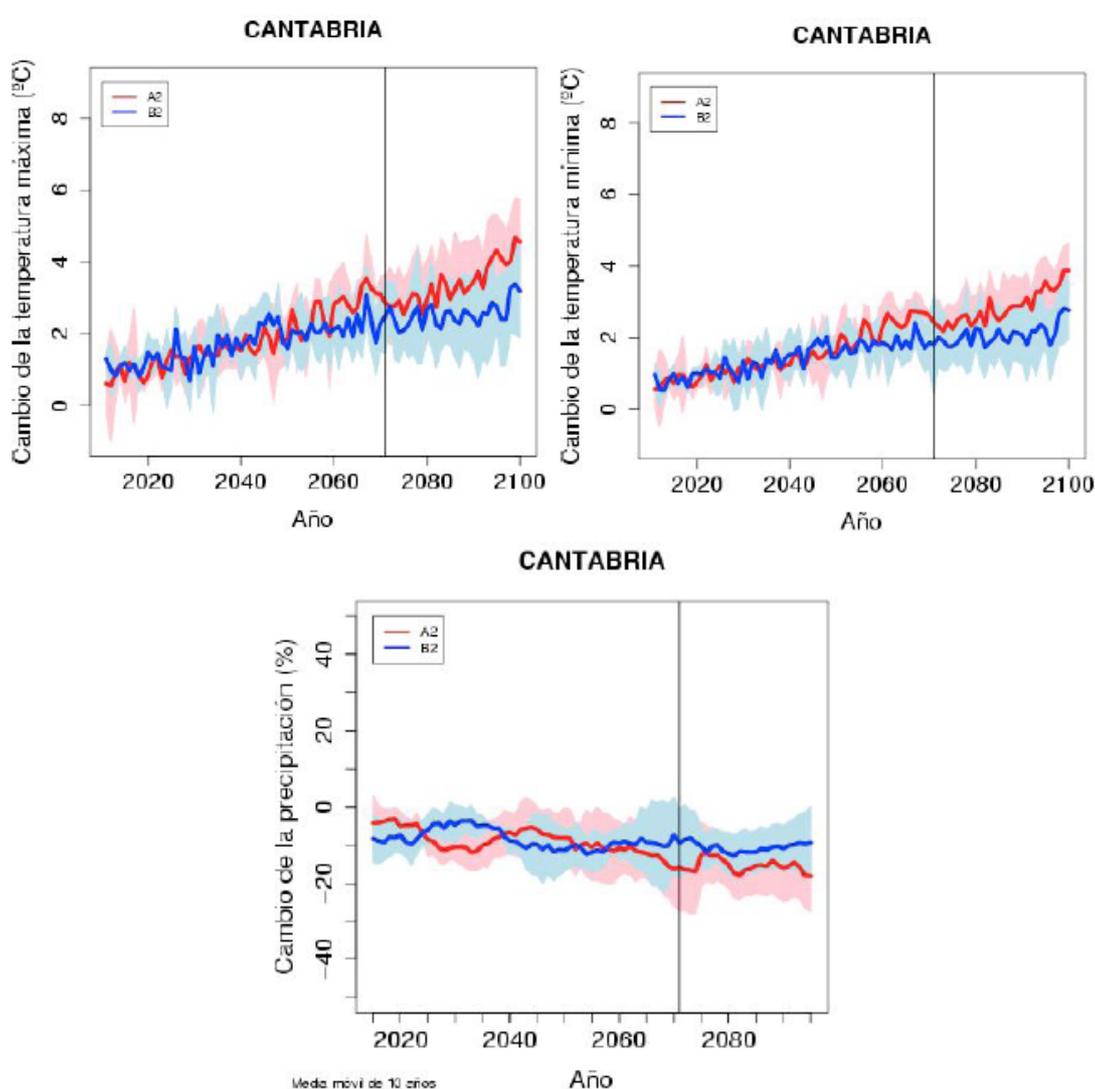


Fig. 1.5: Tendencias de temperatura máxima, mínima y precipitación en Cantabria para dos escenarios distintos (A2 y B2) utilizando distintas técnicas de regionalización a partir de los modelos globales del IPCC-AR3, 2001. Las líneas muestran las medias del multi-modelo mientras que las sombras muestran la incertidumbre asociada (FUENTE: Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España, AEMET, 2009).

Tabla 1.1. Modelos globales del clima que han contribuido al cuarto informe del IPCC-AR4 y que forman parte del PCMDI (CMIP3). Este multi-modelo constituye el conjunto de simulaciones más actualizado disponible hasta la fecha para abordar estudios de cambio climático. Los modelos marcados en azul y negrita han sido utilizados en el trabajo descrito en el presente documento.

Para más detalles sobre los modelos: http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/model_documentation

Institución, País	Nombre	Atmósfera	Resolución	Océano	Resolución	Criosfera	Litosfera
Beijing Climate Center, China	BCC-CM1	BCC T63	T63: L16	IAP T63	L30, 1.875°x1.875	Thermody namic	NCC/BATS/ Sun snow
Bjerknes Centre for Climate Research, Norway	BCM, v2	ARPEGE- CLIMAT,v3	T63: L31 2.8°x2.8°	NERSC	L35, 1.5°x1.5°	NERSC Sea Ice	ARPEGE- CLIMAT,v3
National Center for Atmospheric Research, USA	CCSM3	CAM3	T85: L26 1.4°x1.4°	POP 1.4.3	L40, 1.125°x(0.27- 1.0)°	CSIM5	CLM3
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada	CGCM3.1	AGCM3	T47: L31 3.75°x3.75°,		L29, 1.8°x1.8°		
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada	CGCM3.1	AGCM3	T63: L31 2.81°x2.81°		L29, 1.4°x0.94°		
Centre National de Recherches Météorologiques, France	CNRM- CM3	ARPEGE- CLIMAT,v3	T63: L45 2.81°x2.81°	OPA 8.1	182x152 grid~2°x1.1°	GELATO 2	ISBA
CSIRO, Australia	CSIRO Mark 3.0		T63: L18 1.875°x1.87 5°	MOM2.2	L31, 1.875°EWx0.84° NS		
CSIRO, Australia	CSIRO Mark 3.5		T63: L19 1.875°x1.87 5°	MOM2.3	L31, 1.875°EWx0.84° NS		
Max Planck Institute for Meteorology, Germany	ECHAM5/ MPI-OM	ECHAM5	T63: L31	MPI-OM	L40, 1.5°x1.5°		
University of Bonn and Institute of KMA, Germany-Korea	ECHO-G	ECHAM4+ HOPE-G	T30: L19				
LASG, Institute of Atmospheric Physics, China	FGOALS 1.0_g	GAMIL1.0	T42: L26 2.8°x2.8°	LICOM1.0	1°x1°	CSIM4	CLM2
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	CM2.0 - AOGCM	AM2P13	L24 2.5°x2.0°	OM2P4	1°x1°	SIS	LM2
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	CM2.1 - AOGCM	AM2P13	L245 2.5°x2.0°	OM2P4	1°x1°	SIS	LM2

NASA Goddard Institute for Space Studies, USA	AOM 4x3		L12 4°x3°		L16, 4°x3°		
NASA Goddard Institute for Space Studies, USA	GISS Model E-H	GISS Model E	5°x4°	GISS Model E-R	5°x4°		
NASA Goddard Institute for Space Studies, USA	GISS Model E-R	GISS Model E	5°x4°	GISS Model E-H HYCOM	5°x4°		
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Italy	INGV-SXG	ECHAM4.6	T106: L19 1.125°x1.125°	OPA8.2	2°x2°	LIM	
Institute of Numerical Mathematics, Russia	INMCM3.0		L21 5°x4°		L33, 2.5°x2°		
Institut Pierre Simon Laplace, France	IPSL-CM4	LMDZ-4	L19 2.5°x3.75°	ORCA	2°x2°	LIM	ORCHIDEE
CCSR/NIES/FRCGC, Japan	MIROC3.2	AGCM5.7b	T106: L56 1.125°x1.125°	COCO3.3	L47, 0.28125°x0.1875	COCO3.3	MATSIRO
CCSR/NIES/FRCGC, Japan	MIROC3.2	AGCM5.7b	T42: L20 2.8°x2.8°	COCO3.3	L43,1.4°x(0.5-1.4)°	COCO3.3	MATSIRO
Meteorological Research Institute, Japan	MRI-CGCM2.3.2		T42:L30 2.8°		2.5°x(2-0.5)°		
National Center for Atmospheric Research, USA	PCM	CCM	T42: L26 2.8°x2.8°	POP	L40, 320x384	CSIM	LSM
Hadley Centre for Climate Prediction and Research, UK	HadCM3	HadCM3	2.7°x3.75°	HadCM3	1.25°x1.25°	HadCM3	HadCM3
Hadley Centre for Climate Prediction and Research, UK	HadGEM1	HadGAM1	N96: L38 1.25°x1.875°	HadGOM1	L40, 1°x1°	HadGOM1	MOSES-2

CAPÍTULO 2

Climatología de Cantabria: Termopluviometría de 1950-2000

Grupo Responsable:
Agencia Estatal de Meteorología (Delegación Territorial en Cantabria)
rct@inm.es

2.1. Introducción

La antigua idea de clima, tal como la definiera J. Hann en su Manual de Climatología de 1883 "*conjunto de los fenómenos meteorológicos que caracterizan el estado medio de la atmósfera en un punto cualquiera de la Tierra*", ha sido utilizada durante muchos años para, por ejemplo, definir clasificaciones climáticas como la de W. Köppen de 1902, aceptando implícitamente que las condiciones climáticas de un lugar no están sometidas a variaciones significativas. Sin embargo, este concepto del clima ha sufrido una significativa transformación. Durante la primera mitad del siglo XX se produce un extraordinario impulso en el conocimiento de la dinámica atmosférica, y la climatología de la época incorpora estos avances y amplía su objeto de estudio incorporando nuevos conceptos como los patrones de circulación o los tipos de tiempo. Durante la segunda mitad del siglo se va poniendo de manifiesto la necesidad de abordar el estudio de la variabilidad climática debido, por una parte, al mejor conocimiento de las causas astronómicas que han generado las fluctuaciones climáticas a escalas de tiempo geológicas (tales como las glaciaciones, expuestas por M. Milankhovich en 1941) y, por otra, a la aparición de evidencias de que las condiciones ambientales de los últimos siglos no habían sido tan estables como se suponía. Desde la discreta bonanza de las condiciones agrícolas que acompañaron la expansión de los Vikingos hacia Islandia y Groenlandia entre los siglos X y XII, hasta los rigores de la Pequeña Edad del Hielo europea cuyo periodo central se sitúa en la segunda mitad del siglo XVII.

La variabilidad documentada obliga por tanto a hacer progresivamente más compleja la descripción del clima, y a ampliar su campo de estudio. Peixoto y Oort (1992), en su manual de climatología, incorporan este carácter complejo afirmando que "*el clima es el estado físico medio del sistema climático y que se puede definir a través de un conjunto de cantidades promediadas, completadas con estadísticos de momento superior (varianzas, covarianzas, correlaciones, etc.) que caracterizan la estructura y el comportamiento de la atmósfera, hidrosfera y criosfera durante un periodo de tiempo*" (por ejemplo, la OMM fija en 30 años el periodo de tiempo mínimo para definir el clima). La afirmación contiene parte de los principios del nuevo paradigma: el carácter sistémico del clima, y la necesaria incorporación de técnicas estadísticas más complejas, en ocasiones desarrolladas ex novo para dar respuesta a las necesidades de esta ciencia, y que la otorgan la nueva dimensión para desarrollarse como ciencia prospectiva.

2.2. Las Redes de Observación. Antecedentes en Cantabria

Tanto si se realiza un estudio descriptivo del clima pasado, como si se pretende comprender un pronóstico climático, el punto de partida está en el conocimiento que tenemos de la fluctuación de los elementos climáticos. Este conocimiento se fundamenta en el registro de los valores que

alcanzan las variables meteorológicas, típicamente la temperatura y precipitación, en un lugar determinado. Por tanto, la observación es una actividad fundamental y sólo una recogida detallada, suficientemente prolongada en el tiempo y sujeta a normas estrictas, ofrece conjuntos de valores que pueden ser tratados como series climáticas. Las características del recinto donde se distribuyen los instrumentos de medida, tanto las del suelo como del terreno circundante, la posición que ocupan los pluviómetros, la garita meteorológica, la de los termómetros en su interior, deben mantenerse a lo largo del tiempo para que los valores recogidos constituyan una muestra de datos homogénea. Cualquier cambio en alguna de estas condiciones supone una alteración de la muestra, introduciendo datos anómalos o errores, que pueden enmascarar las características de las variaciones naturales de los distintos elementos del clima. Por tanto, la situación ideal para conocer el clima de una región es disponer de datos históricos en una serie de emplazamientos fijos representativos, que hayan permanecido inalterados en un entorno ajeno a transformaciones urbanas, dotados del material adecuado y atendidos por personal familiarizado con la tarea encomendada. Sin embargo, la realidad muestra que resulta difícil prever el curso de los acontecimientos, y que la actividad humana está sometida a continuos cambios, provocando el cambio de emplazamientos, de material de medición, la interrupción de series, etc. En estos casos resulta necesario homogeneizar las series históricas disponibles para que puedan ser utilizadas en la descripción del clima (por ejemplo, en el Cap. 3 se describe la tarea realizada en este sentido para dos series representativas del clima de Cantabria: Santander y Reinosa).

La primera descripción climática moderna hecha sobre la base de observaciones recogidas con instrumentos de la región es de 1826 y se refiere a la ciudad de Santander, que dispone de registros meteorológicos que se cuentan entre los más largos de la Península Ibérica: *"Goza ordinariamente este territorio de una temperatura templada muy variable. El máximo de calor en los meses de verano suele ser de 20 a 22 gr th Reamur, y el mínimo en el invierno de 4 a 0. [...] estos últimos años, que han sido cálidos y secos, ha llovido con corta diferencia en 170 observaciones [...] Se presentan con frecuencia mutaciones repentinas de calor a frío y viceversa, y las mismas vicisitudes se observan respecto de las lluvias y de los vientos. [...] Los (vientos) del Mediodía, cálidos y secos, soplan en ocasiones con extremada impetuosidad [...]"*. A pesar de que la información que contiene pueda parecer escasa, es significativamente más amplia y más precisa que la que le dedica el Diccionario Geográfico y Estadístico de Pascual Madoz publicado entre 1845 y 1850, que se conforma con una descripción cualitativa y muy somera, aunque enumera también las características de los elementos climáticos principales, temperatura, humedad y viento: *"Su clima es generalmente templado y sano, aunque húmedo. Los vientos que reinan comúnmente, y con más constancia en la costa, son del 3º y 4º cuadrantes, con grandes mares en invierno y fuertes tronadas en el verano, a veces del O.; en otoño son frecuentes el vendaval y Sur"*.

La primera evidencia detallada de observaciones climatológicas en la región aparece publicada en el Boletín Oficial de la Provincia de Santander de 25 de junio de 1858, donde se recogen los valores mensuales de las observaciones realizadas por el gabinete de física del Instituto de Santander durante el año 1857, en una etapa anterior a la difusión y uso generalizado del Sistema Decimal de medida, en la que todavía se recogen la altura del barómetro y la cantidad de lluvia recogida en pulgadas y en pies castellanos. La observación se establece con carácter permanente a partir de 1876. La primera etapa de observaciones se extiende hasta el año 1897, pero sólo está recogida desde el año 1878 en los resúmenes de las observaciones efectuadas en la Península que publicó el Observatorio Central Meteorológico. Durante esos años se toman datos de temperatura, humedad, presión atmosférica, dirección y recorrido del viento cuatro veces al día. Se observan además las temperaturas máxima, mínima y mínima de irradiación, la evaporación y la lluvia recogida en el pluviómetro una vez cada 24h. En 1897 las observaciones se interrumpen hasta 1901 en el que se reanudan para concluir ya definitivamente en 1915. En esta segunda etapa las observaciones se limitan a dos lecturas diarias de temperatura, humedad,

presión atmosférica, dirección del viento, y estado de la atmósfera, y una de temperatura máxima, mínima, irradiación, evaporación y precipitación caída, y un interesante diario meteorológico en el que el observador va recogiendo la descripción meteorológica del día en cuestión. En 1911 se establece el observatorio provincial, que llegaría a su emplazamiento casi definitivo en 1923, en el paseo del Alta, actual Paseo General Dávila, donde realizó las labores propias de la Red Básica de Observación hasta el año 1997 cuando se trasladó al lugar que ocupa ahora la Delegación Territorial de AEMET, próximo al faro de Cabo Mayor.

2.3. El Clima de Cantabria

Cantabria tiene un clima similar al de Europa Occidental, de tipo *Cfb* según la clasificación de Köppen (ver Figura 2.1), que corresponde al llamado clima oceánico o atlántico, templado y húmedo, que es característico de las regiones más occidentales de las grandes masas continentales como Europa Occidental. Este clima está definido por ser templado mesotermal, sin estación seca y con verano suave (la temperatura media del mes más cálido no llega a los 22°C y, además, se superan los 10°C durante cuatro o más meses al año). En Santander, por ejemplo, la temperatura media del mes más frío está en torno a los 9°C, la temperatura media del mes más cálido se estima en 20°C y la precipitación total anual supera los 1200mm.

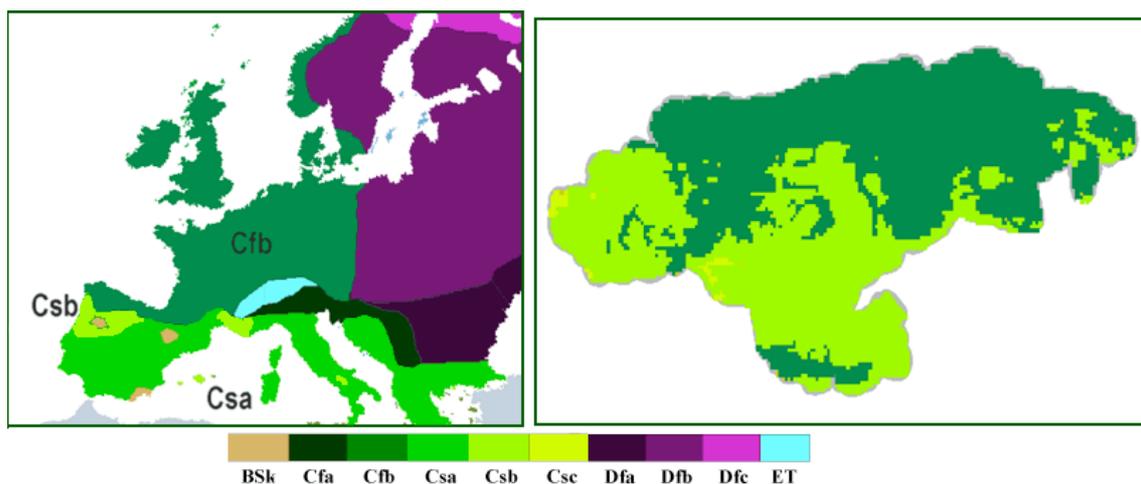


Fig. 2.1: (izquierda) Clasificación climática de Europa occidental según el esquema de Köppen. (derecha) Detalle de la clasificación climática de Cantabria, obtenida a partir de los datos de la rejilla de 1km descrita en el Capítulo 4 (fuente: R. García-Manzanas, grupo de Meteorología de UC; comunicación personal).

Al igual que en Santander, el clima del resto de Cantabria se caracteriza por disfrutar de un régimen de temperaturas suaves y templadas, con una oscilación térmica limitada por la presencia del océano, y por la abundancia de lluvias repartidas a lo largo de todo el año; por ello, se puede decir que la mayor parte de Cantabria encaja en el tipo de clima *Cfb*. Sin embargo, considerando que las heterogeneidades climáticas dependen del tipo de suelo, su forma, pendiente media, orientación, altitud y proximidad al mar, se comprende fácilmente que, por su complejidad orográfica, Cantabria presente notables singularidades en algunas comarcas, como Liébana y Campoo-Los Valles, por citar las más relevantes. Así, por ejemplo en Reinosa, la temperatura media del mes más frío está en torno a los 2°C, la temperatura media del mes más cálido se estima en 15°C y la precipitación total anual ronda los 1000mm, lo cual la sitúa en el límite de las especificaciones del clima *Cfb* con el clima *Csb*, el cual se diferencia del *Cfb* por tener un verano más seco.

Por tanto, lo más sencillo es dividir Cantabria en dos zonas climáticas (ver Figura 2.1):

- Clima tipo *Cfb* situado en la vertiente Norte. Esta zona se puede subdividir a su vez en:
 - Franja litoral, con una anchura media de unos 20km, que varía ligeramente dependiendo de la orografía.
 - Zona de Valles interiores de la vertiente Norte, con fuerte influencia marítima mezclada con características de media montaña.
- Clima tipo *Csb*, que se puede subdividir a su vez en:
 - Zona de Liébana, se encuentra en el límite entre *Cfb* y *Csb*, con ligera influencia marítima mezclada con características de media y alta montaña.
 - Vertiente Sur, con clima tipo *Csb*.

2.4. Termopluviometría de Cantabria

Para realizar este estudio termopluviométrico de Cantabria se ha partido de un estudio preliminar del clima de la región cantábrica (Cano, 1999) y se ha utilizado un subconjunto de 108 series pluviométricas y 89 termométricas de la red secundaria de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), consideradas idóneas en base a su ubicación, longitud y calidad, durante el periodo 1950-2000 a escala diaria (ver Tablas 2.1 y 2.2, respectivamente); estas estaciones son un subconjunto de las representadas en la Figura 1.3, que muestra el inventario de estaciones de AEMET en Cantabria. Como se puede apreciar en esta figura, aunque los puntos de observación dan buena cobertura espacial de los elementos temperatura y precipitación, no tienen suficiente resolución como para reflejar apropiadamente la orografía y la heterogeneidad climática de Cantabria. Por tanto, se han combinado los valores observados a escala anual con la orografía (la altura, en una rejilla de 1km en un rectángulo $-5^{\circ}W$, $-3^{\circ}W$, $42.7^{\circ}N$ y $43.6^{\circ}N$) utilizando una técnica semiobjetiva de realce topográfico basada en regresión (ver Cano y Gutiérrez, 2004).

Para ello, se ha procedido de forma supervisada, utilizando un modelo lineal de interpolación local que asigna cada nodo a una cuenca fluvial y considera las estaciones más próximas dentro de dicha cuenca. A partir de los resultados obtenidos y en base al conocimiento del clima se han introducido valores virtuales para corregir algunos defectos claramente identificables en los mapas preliminares. En el caso de la precipitación, estos valores virtuales han sido estimados a partir de estaciones complementarias cuyo periodo de funcionamiento queda fuera de la ventana 1950-2000 y han sido introducidos en tres localidades: San Miguel de Lúena (~ 1400mm/año), Uznayo (~ 1600mm/año) y La Hermida (~ 1100mm/año).

El caso de las temperaturas es más sencillo, ya que su variabilidad espacial está fuertemente ligada a la elevación. Sin embargo, la estación más alta utilizada se encuentra a 1402 m y, por tanto, el modelo está extrapolando las temperaturas de las zonas más elevadas. Para corregir este error se llevó a cabo un estudio, considerando las temperaturas de 2740 estaciones termométricas de AEMET en toda la Península para obtener empíricamente la relación entre altitud y temperatura. En la Figura 2.2 se puede observar la tendencia de la temperatura con la altura, utilizando valores medios anuales, tanto para todas las estaciones peninsulares, como para las estaciones del tercio Norte, con latitudes similares y un comportamiento más homogéneo. Finalmente, para tener en cuenta el efecto moderador del mar en este modelo, se ha impuesto un valor virtual constante para la temperatura del mar, estimado en $15.4^{\circ}C$.

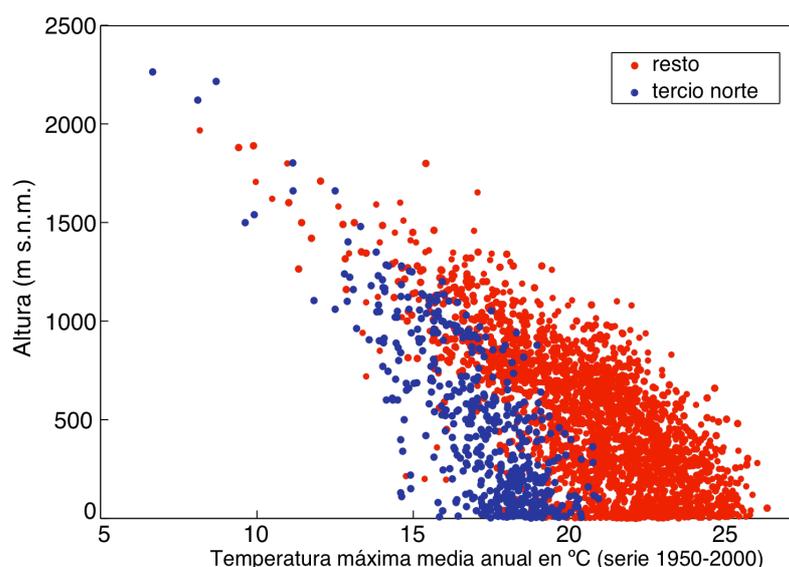


Fig. 2.2: Variación de la temperatura con la altura en las estaciones de AEMET de la Península. En azul se muestran las estaciones del tercio norte (con valores similares de latitud) y en rojo se muestran las restantes estaciones.

2.4.1 Termometría de Cantabria

El régimen termométrico anual es muy regular, con los valores medios más altos en agosto y los más bajos en enero, aunque se aprecia un ligero desfase (estimado en unos 10 días) entre el litoral y el interior, debido a la inercia térmica del mar. En la Figura 2.3 se muestra el ciclo anual de temperaturas extremas máxima y mínima; por una parte se muestran las estaciones de la vertiente Norte (en azul) y por otra para las de la vertiente Sur (en rojo). A la vista de esta figura, no se puede decir que exista un régimen termométrico genérico válido para toda Cantabria y su entorno, ya que mientras que las temperaturas son suaves todo el año en las regiones litorales, con una escasa oscilación anual, en las zonas altas de la vertiente Sur las temperaturas son más rigurosas, especialmente en invierno, presentando una oscilación anual propia del clima continental.

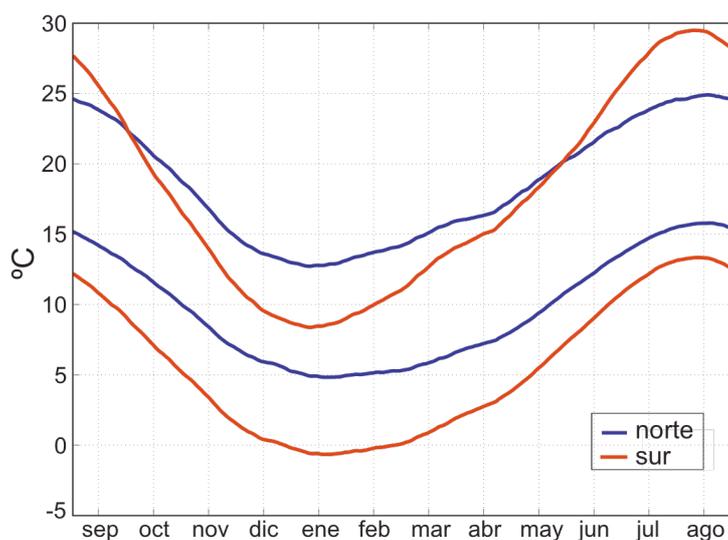


Fig. 2.3: Régimen termométrico durante el año hidrológico en las dos vertientes de Cantabria (serie 1950- 2000). La curva azul (roja) superior representa la temperatura máxima y la curva azul (roja) inferior representa la temperatura mínima.

Como norma general, válida para toda la región, se observa un descenso térmico con la altura de unos 0.5°C cada 100 metros. Este es un valor medio, que no se mantiene en el día a día; por ejemplo, en las mañanas anticiclónicas de los valles interiores, debido a que durante la noche el aire frío de las alturas se ha hundido al fondo de los valles por su mayor densidad, estos son más fríos que las cumbres. Si se observa la distribución espacial de temperaturas que se muestra en las Figuras 2.4 y 2.5, los valles cántabros más fríos son Polaciones, Hermandad de Campoo de Suso, Campoo de Yuso, Enmedio, Valdeolea, Valdeprado del Río y Valderredible con temperaturas medias claramente inferiores a 10°C y temperaturas mínimas anuales de -15°C. Del mismo modo, en el otro extremo, los más templados son los valles del Besaya, Pas y Asón, así como el del Carranza entre Cantabria y Vizcaya, con medias ligeramente superiores a los 14°C y máximas anuales en torno a los 35°C.

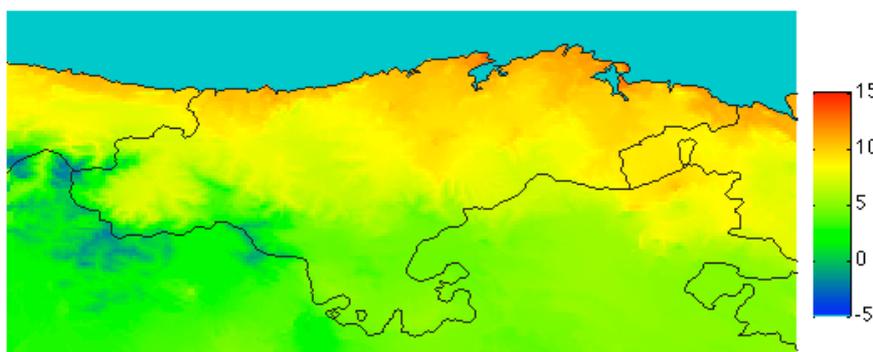


Fig. 2.4: Temperatura mínima media anual en °C (serie 1950-2000).

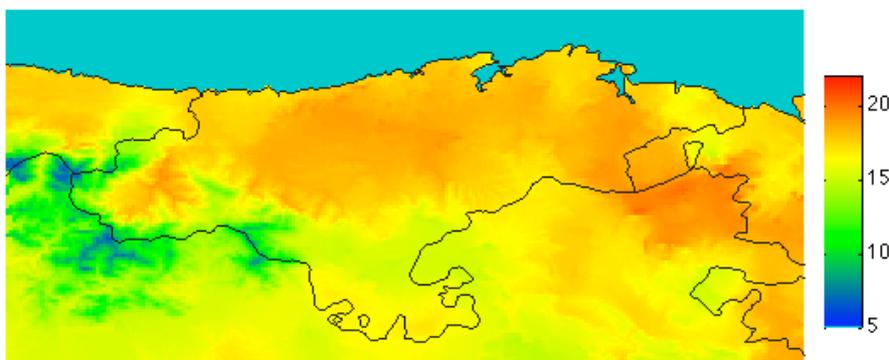


Fig. 2.5: Temperatura máxima media anual en °C (serie 1950-2000).

2.4.2 Pluviometría de Cantabria

Así como las diferencias estacionales de temperatura se explican, en gran parte, con la inclinación del eje terrestre, la precipitación depende fuertemente de la circulación atmosférica y de su interacción con la complicada orografía de Cantabria. Por ello, el régimen pluviométrico es bastante complejo, aunque también presenta unas características climatológicas comunes a toda la región, que se pueden resumir en abundancia de precipitaciones a lo largo del año con dos máximos, uno principal a finales de otoño, y otro secundario en primavera. En la Figura 2.6 se muestra por separado el régimen anual de precipitaciones para las estaciones de la cuenca Norte (en azul) y por otra para las de la vertiente Sur (en rojo). El máximo pluviométrico de otoño se centra en noviembre y diciembre y es debido al continuo paso de sistemas de bajas presiones procedentes de latitudes más bajas y que circulan preferentemente de suroeste a noreste; esta es una situación muy característica y bien conocida que comienza con vientos del sur y termina con vientos del noroeste. Este máximo pluviométrico afecta por igual a las

vertientes norte y sur de toda la Cordillera Cantábrica, con precipitaciones en forma de lluvia y nieve (cuando nieva en las zonas medias y altas, suele granizar en la franja costera). El máximo pluviométrico de primavera se centra en abril y es debido a un repunte en el paso de sistemas de bajas presiones que en esta ocasión circulan por latitudes más altas por lo que los sures son más raros en esta época. Este máximo pluviométrico afecta principalmente a la vertiente norte de la mitad oriental de Cantabria, con precipitaciones en forma de lluvia y también de nieve (al igual que en invierno, cuando nieva en primavera en las zonas medias y altas, suele granizar en la franja costera).

El periodo intermedio entre final de primavera y comienzo del verano está más dominado por vientos del Oeste, que a menudo producen lloviznas (morrinas) por estancamiento de la nubosidad. Julio y agosto son meses dominados por los vientos del nordeste que suelen traer tiempo seco y apacible. Es la época menos lluviosa del año, aunque también es la época de las tormentas de verano que se forman a primeras horas de la tarde en la meseta norte y son desplazadas hacia el litoral a final de la tarde, cuando la brisa deja de poner freno al calor del interior. A pesar de encontrarnos en una región húmeda, en verano y en la zona litoral, en promedio sólo uno de cada quince días tiene más de dos horas de precipitación durante el día.

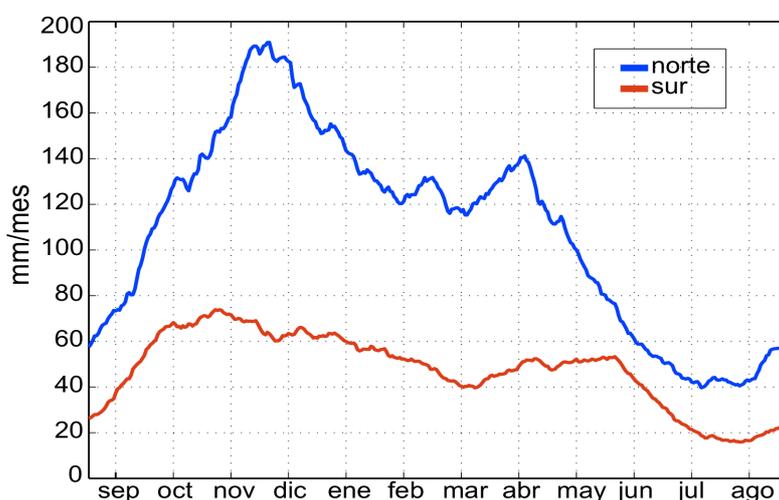


Figura 2.6: Régimen pluviométrico durante el año hidrológico en las dos vertientes de Cantabria (serie 1950-2000).

La distribución espacial de las precipitaciones se muestra en la Figuras 2.7, donde puede observarse que las precipitaciones superan los 1000 mm/año en el 90% de su territorio (a excepción de la zona Sur de Campoo - Los Valles y la cotas inferiores del valle de Liébana) con dos máximos marcados en la cabecera de los ríos Miera y Pas y en los Picos de Europa.

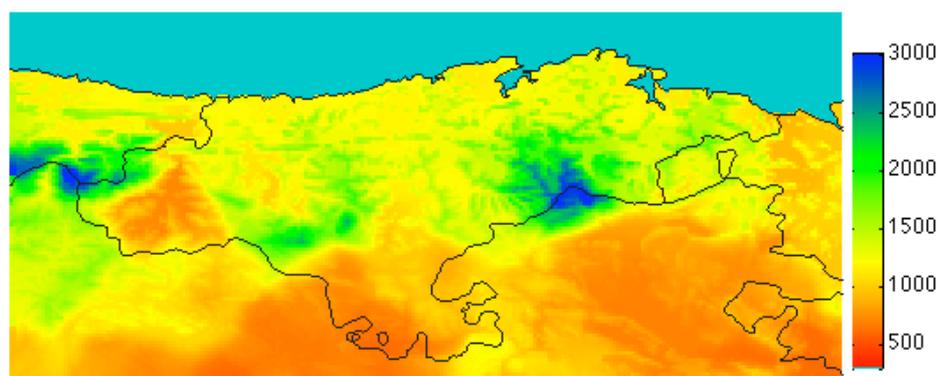


Fig. 2.7 Precipitación acumulada anual en mm (serie 1950-2000)

Tabla. 2.1: Valores medios anuales de precipitación acumulada (en mm) en estaciones de referencia, ordenadas según su precipitación (serie 1950-2000).

ESTACIÓN	longitud	latitud	altitud	Precip.
LA CONCHA SAN ROQUE RIOMIERA	-3.696	43.200	570	2331
MIRONES	-3.705	43.294	200	1925
TRESVISO	-4.674	43.258	900	1900
ARREDONDO	-3.596	43.274	140	1614
EL MERCADILLO DE LIERGANES	-3.746	43.344	90	1595
SAN MARTIN DE VILLAFUFRE	-3.880	43.258	300	1575
GURIEZO 'G.C.'	-3.327	43.356	77	1573
BESANDE	-4.885	42.899	1280	1569
RUENTE	-4.267	43.259	190	1541
ESCOBEDO DE VILLAFUFRE	-3.910	43.267	180	1537
MERUELO VERTEDERO	-3.606	43.425	250	1477
COTERILLO DE AMPUERO	-3.433	43.338	25	1438
POLACIONES 'LA LAGUNA'	-4.405	43.122	790	1415
BENIA	-4.967	43.335	210	1408
VIOÑO 'G.C.'	-3.969	43.356	60	1375
UDALLA	-3.455	43.317	80	1358
PUENTE ARCE	-3.941	43.408	13	1351
PORTILLA DE LA REINA	-4.852	43.040	1231	1344
BOCA DE HUERGANO	-4.927	42.972	1104	1341
BAREYO	-3.585	43.470	115	1341
ROBREDO AHEDO	-3.810	43.019	760	1327
ARCENTALES	-3.219	43.240	220	1323
VIDIAGO	-4.666	43.396	60	1316
GOLBARDO	-4.159	43.341	75	1305
SAN MARTIN DE TORANZO	-3.930	43.219	140	1303
LOS CORRALES DE BUELNA	-4.063	43.258	100	1296
PRIORO	-4.960	42.893	1123	1294
EMBALSE DE LA COHILLA	-4.394	43.131	785	1290
CAMIJANES	-4.488	43.328	115	1289
VALMASEDA	-3.189	43.203	320	1279
HOZ DE ANERO-LA AGUERA	-3.667	43.403	35	1277
CELIS	-4.433	43.283	100	1273
PANTANO DE ORDUNTE	-3.300	43.150	400	1273
SOTO IRUZ	-3.939	43.276	85	1269
VILLAVERDE DE PONTONES	-3.696	43.408	23	1262
CECEÑAS	-3.689	43.379	34	1262
TRETO	-3.469	43.400	1	1254
TERAN	-4.302	43.221	254	1248
EL TOJO-REVILLA	-3.871	43.400	90	1244
SANTANDER 'CENTRO'	-3.819	43.465	64	1236
PARRES DE LLANES	-4.778	43.407	70	1232
SUESA	-3.716	43.444	15	1230
REOCIN	-4.091	43.339	107	1217
ONTANEDA 'G.C.'	-3.924	43.200	160	1211
NOVALES	-4.169	43.378	90	1202
VIERNOLES	-4.055	43.322	70	1188
LORES	-4.534	42.999	1210	1160
MOLLEDO DE PORTOLIN	-4.035	43.144	242	1160
PANTANO DE CAMPORREDONDO	-4.738	42.900	1253	1157

RALES DE LLANES	-4.890	43.410	23	1157
SANTANDER OJAIZ	-3.882	43.445	50	1153
LAREDO	-3.410	43.406	37	1131
ROZADIO	-4.385	43.222	210	1129
PANTANO DE COMPUERTO	-4.833	42.856	1140	1116
SAN JUAN DE REDONDO	-4.449	42.989	1218	1110
GORDEJUELA 'BARRIO MOLINAR'	-3.069	43.179	80	1109
LA LASTRA	-4.669	42.915	1370	1108
SANTIBAÑEZ DE RESOBA	-4.609	42.910	1260	1107
VENTANILLA	-4.562	42.881	1051	1087
GORDEJUELA	-3.100	43.167	100	1087
LENDONÑO	-3.050	43.017	440	1071
PANTANO DE CERVERA	-4.527	42.867	1000	1060
TREMAYA	-4.463	42.982	1181	1058
VELILLA DEL RIO CARRION	-4.846	42.828	1121	1052
CILLERUELO DE BEZANA	-3.849	42.972	870	1044
SANTOÑA-PENAL	-3.458	43.462	24	1036
LA LASTRA 'PEÑA DE BEJO'	-4.377	43.150	430	1034
PUNTA GALEA ""GOLF""	-3.019	43.375	90	1032
VILLASUSO	-4.019	43.011	864	1014
CERVERA DE PISUERGA	-4.499	42.864	1013	1004
ORDUÑA	-3.021	42.993	320	981
EL CAMPO 'URBANEJA'	-4.510	42.976	1185	958
POLENTINOS	-4.527	42.939	1245	953
SAN SALVADOR DE CANTAMUDA	-4.499	42.964	1107	953
SONCILLO	-3.788	42.969	845	933
TARANILLA	-4.980	42.797	1005	922
GUEÑES	-3.102	43.203	208	918
VALDEPRADO 'PESAGUERO'	-4.516	43.075	833	912
ARIJA	-3.950	42.992	850	876
VILLAÑO DE LOSA	-3.123	42.967	800	857
PANTANO DE REQUEJADA	-4.530	42.908	1024	853
VALLE MANZANEDO RIOSECO	-3.633	42.892	600	845
CASTROBARTO	-3.384	43.042	690	817
VILLANUEVA DE ARRIBA	-4.780	42.792	1120	801
BUTRERA	-3.588	43.000	600	777
SAN LLORENTE DE LOSA	-3.242	42.971	630	757
SAN ANDRES DE ARROYO	-4.388	42.700	930	749
ORBO 'BARRIO DE VALLEJO'	-4.263	42.888	1082	745
ENTERRIAS	-4.678	43.099	735	737
TAMA	-4.594	43.181	270	733
PERAZANCAS DE OJEDA	-4.423	42.783	1008	723
CONGOSTO DE VALDAVIA	-4.634	42.715	969	713
VILLARCAYO	-3.572	42.941	595	710
MIÑON	-3.501	42.945	595	707
POMAR DE VALDIVIA	-4.170	42.774	936	707
LA ALDEA DEL PORTILLO	-3.533	42.894	635	705
CEBOLLEROS	-3.422	42.861	598	694
SALINAS DE PISUERGA	-4.378	42.850	944	680
BARRIO DE STA. MARIA	-4.380	42.821	962	678
PANTANO DE AGUILAR	-4.281	42.793	903	673
COZUELOS DE OJEDA	-4.394	42.754	983	668
OLMOS DE OJEDA 'PROPASI'	-4.424	42.719	930	629

CASTRILLO DE VALDELOMAR	-4.120	42.799	840	617
PUENTELARRA IBERD	-3.047	42.750	473	610
PAYO DE OJEDA	-4.483	42.719	1003	598

Tabla. 2.2: Valores medios anuales de temperaturas extremas (en °C) en estaciones de referencia, ordenadas según su temperatura máxima media anual (serie 1950-2000).

ESTACIÓN	longitud	latitud	altitud	máx.	mín.
PANTANO DE ORDUNTE	-3.300	43.150	400	20.0	10.2
VALMASEDA	-3.189	43.203	320	19.9	8.7
CECEÑAS	-3.689	43.379	34	19.6	8.9
RUENTE	-4.267	43.259	190	19.4	7.0
PENAGOS 'SOBARZO'	-3.855	43.336	140	19.3	9.2
VIERNOLES	-4.055	43.322	70	19.1	8.3
CARRANZA	-3.360	43.222	220	19.0	9.0
LOS CORRALES DE BUELNA	-4.063	43.258	100	18.9	8.3
TORRELAVEGA 'SNIACE'	-4.035	43.364	70	18.9	9.2
UDALLA	-3.455	43.317	80	18.9	9.7
ESCOBEDO DE VILLAFUFRE	-3.910	43.267	180	18.8	9.9
VILLASANA DE MENA 'E.F.P.'	-3.284	43.099	312	18.7	6.8
AMURRIO 'INSTITUTO'	-3.006	43.051	219	18.7	7.5
SANTANDER OJAIZ	-3.882	43.445	50	18.6	9.7
TRETO	-3.469	43.400	1	18.6	9.5
MIÑON	-3.501	42.945	595	18.5	5.4
TERAN	-4.302	43.221	254	18.5	8.1
MIRONES	-3.705	43.294	200	18.5	9.6
VILLACARRIEDO	-3.805	43.231	212	18.4	8.0
ARREDONDO	-3.596	43.274	140	18.4	8.1
TAMA	-4.594	43.181	270	18.2	7.4
LA CONCHA SAN ROQUE RIOMIERA	-3.696	43.200	570	18.2	7.2
VILLANUEVA DE VALDEGOVIA	-3.103	42.849	590	18.0	4.7
HOZ DE ANERO-LA AGUERA	-3.667	43.403	35	18.0	9.2
PARAYAS 'AEROPUERTO'	-3.819	43.428	6	18.0	10.1
PUNTA GALEA "'GOLF"'	-3.019	43.375	90	18.0	11.0
SAN VICENTE-FARO	-4.391	43.394	39	17.7	10.0
SOTO IRUZ	-3.939	43.276	85	17.7	9.0
TORRELAVEGA-SIERRAPANDO	-4.026	43.358	100	17.6	10.2
MERUELO-VERTEDERO	-3.606	43.425	250	17.6	10.3
SANTANDER "'CMT"'	-3.800	43.492	52	17.4	12.1
GOLBARDO	-4.159	43.341	75	17.3	8.4
SANTOÑA-PENAL	-3.458	43.462	24	17.3	10.8
ONTON	-3.174	43.356	80	17.2	10.7
SANTANDER 'CENTRO'	-3.819	43.465	64	17.2	11.4
BAREYO	-3.585	43.470	115	17.0	10.9
LALASTRA 'P.N. VALDEREJO'	-3.230	42.878	911	16.9	4.8
OLMOS DE OJEDA 'PROPASI'	-4.424	42.719	930	16.9	4.6
MATAPORQUERA	-4.172	42.884	953	16.8	5.1
ENTERRIAS	-4.678	43.099	735	16.7	7.4
BARCENA MAYOR	-4.194	43.144	495	16.7	6.9
SOTO DE VALDEON	-4.950	43.150	940	16.6	4.5

ARENAS DE CABRALES	-4.808	43.301	120	16.4	8.4
GORDEJUELA 'BARRIO MOLINAR'	-3.069	43.179	80	16.4	7.2
PANTANO DE AGUILAR	-4.281	42.793	903	16.0	3.7
CERVERA DE PISUERGA 'PARADOR'	-4.530	42.875	1134	16.0	4.6
BOCA DE HUERGANO	-4.927	42.972	1104	15.8	1.5
PANTANO DE REQUEJADA	-4.530	42.908	1024	15.8	2.5
PANTANO DE CERVERA	-4.527	42.867	1000	15.7	3.4
PRIORO	-4.960	42.893	1123	15.5	2.7
GUARDO	-4.842	42.790	1110	15.5	2.8
PANTANO DE COMPUERTO	-4.833	42.856	1140	15.3	2.7
CERVERA DE PISUERGA	-4.499	42.864	1013	15.3	2.5
VILLARCAYO	-3.572	42.941	595	15.2	5.3
CAMESA DE VALDIVIA	-4.235	42.785	893	15.2	1.5
PANTANO DE CAMPORREDONDO	-4.738	42.900	1253	14.9	1.7
TRESVISO	-4.674	43.258	900	14.9	7.2
ARCENTALES	-3.219	43.240	220	14.9	8.1
VELILLA DEL RIO CARRION	-4.846	42.828	1121	14.8	3.1
EL CAMPO 'URBANEJA'	-4.510	42.976	1185	14.6	2.2
BESANDE	-4.885	42.899	1280	14.2	2.8
LORES	-4.534	42.999	1210	14.0	2.1
LLANAVES DE LA REINA	-4.801	43.054	1402	12.9	1.9

CAPÍTULO 3

Series Mensuales de Referencia para Santander y Reinosa en el S. XX

Grupo Responsable:

Grupo de Investigación en Geografía Histórica del Paisaje

manuel.frochoso@unican.es

3.1. Introducción

El estudio de la variabilidad climática se basa en la detección de cambios en las series temporales de las variables climáticas que se analizan. Sin embargo, no todos ellos son espontáneos, naturales o propios del clima, sino que con frecuencia reflejan alteraciones en la rutina de toma de datos, en los métodos de observación, errores instrumentales, desplazamiento de los sensores, y otros pequeños cambios que modifican las características de la serie. Una serie climatológica se dice homogénea si sus registros están obtenidos en un mismo lugar, sin cambios en el entorno, con los mismos instrumentos y los mismos métodos de observación. Sin embargo, la mayor parte de las series originales presentan problemas de homogeneidad. Tanto mayores cuanto más larga es la ventana temporal que abarcan. Las series que consiguen mantener las observaciones sin interrupción, y sin la influencia de factores externos, se denominan series de referencia, y resultan de gran valor para establecer pautas de variación de las condiciones climáticas en rango temporal secular o aún mayor, y para depurar otras series. En el contexto del presente proyecto, eliminar los datos erróneos que no son inherentes al ejercicio de la medida de la variable es fundamental para aislar la señal climática y establecer así conclusiones sobre sus cambios o tendencias (Easterling, 1996).

Conseguir un conjunto de datos homogéneos, que pertenezcan a una misma población estadística, pasa por rellenar las discontinuidades o lagunas, detectar errores puntuales de observación, de transcripción o instrumentales, corregir saltos en la media debidos al desplazamiento de los sensores, a cambios de instrumentos, o de los métodos de observación, analizar las posibles tendencias de la serie y corregir aquellas debidas a la incorporación de errores sistemáticos, influencia de la urbanización del entorno próximo, etc., cotejar los datos de la estación con los de otros observatorios vecinos de calidad contrastada. El presente capítulo describe el trabajo realizado para la elaboración de las series de temperatura y precipitación acumulada mensual y anual de Santander y Reinosa, completando los registros ausentes entre los años 1900 y 2000, y cotejando la homogeneidad e independencia de las series resultantes, con el objetivo de disponer de series homogéneas de referencia en Cantabria, representativas de los dos ámbitos regionales principales de diferentes características climáticas.

La tarea asume la particularidad de que es a lo largo de las primeras dos décadas del s. XX cuando se asienta la observación sistemática en nuestro país, generalizándose la red de observatorios provinciales, a la vez que se densificaba la red secundaria con observatorios en manos de colaboradores voluntarios, mayoritariamente en entornos rurales. Estos años de inicio de la actividad son todavía periodos de práctica en los que no están asentados los métodos de observación, ni la dotación instrumental es la misma en todos los emplazamientos. Además, se ponen en marcha observatorios que se clausuran poco tiempo después, generando gran número de series muy cortas.

3.2. Series de Referencia para Precipitación: Datos y Metodología

Para la elaboración de una serie de precipitación de referencia para Santander se seleccionaron los observatorios de la ciudad, y un conjunto significativo de observatorios situados en el litoral cantábrico, desde el Cabo de Peñas hasta Irún (ver Tabla 3.1; todas las series, salvo las que se citan explícitamente, provienen de AEMET). En la elección se ha mantenido un compromiso entre la antigüedad de los datos, la longitud de la serie, y la afinidad climática entre estaciones otorgada *a priori*. Esta afinidad hace referencia a un marco fisiográfico que reúna las siguientes características genéricas: emplazamiento en el litoral cantábrico cercano a la costa, a una altitud no superior a 100 m, sin relieves entre el mar y el observatorio. En cuanto a la duración de la serie, se han elegido las más largas y las que tenían una fecha de comienzo más temprano. Sobre estos criterios objetivos se han hecho ciertas excepciones que permitían:

- Tener un emplazamiento en Asturias con fecha de inicio en 1900 y suficiente continuidad, caso de Oviedo,
- dar continuidad a la serie de San Sebastián, e incorporar así una de las series más largas sin cambio de emplazamiento de toda la península Ibérica, en el caso del observatorio de Igueldo en San Sebastián,
- tener representación en periodos poco cubiertos como en el caso del Faro de Machichaco entre 1916 y 1928,
- incorporar la serie de Villabona, que tiene una aceptable calidad, y es de las más largas de la región
- incorporar las series de Castañeda y Puente Arce a escasa distancia del Aeropuerto de Santander (Parayas) y extendidas en una ventana temporal común con la intención de aportar más información en el área cercana a la capital.

Se obtiene así una representación espacial suficiente en el cantábrico central, y una distribución temporal que es aceptable o buena desde 1945 y disminuye hasta niveles de auténtica necesidad conforme se retrocede en el tiempo. No obstante, se mantiene una presencia mínima de tres estaciones con datos en los primeros años del siglo. Más información sobre los observatorios históricos en la región se tiene en Gutiérrez et al. (2008).

Para la serie de Reinosa, se ha seleccionado un conjunto de series próximas y afines climatológicamente, *a priori*. El área cubierta abarca los tres municipios de la comarca de Campoo, las comarcas limítrofes de la provincia de Burgos, y los valles adyacentes de la provincia de Palencia, del alto Carrión y Pisuerga, y el Campoo palentino. La selección se ha hecho otra vez manteniendo el compromiso entre duración de la serie, representatividad espacial o temporal de los datos y proporción de datos ausentes, principalmente. Aunque se parte de una serie de Reinosa de gran calidad y notable duración, no existe en el entorno cercano ningún observatorio completo con registros antiguos, por lo que ha habido que acudir a los datos de los observatorios históricos de Burgos, Pamplona y Huesca, que aportan datos en las primeras décadas del siglo (Tabla 3.2). También para combatir la falta de registros en esta primera etapa, y sobre todo para dar cierta continuidad regional con la franja litoral, se han incluido los datos de las series costeras de Santander Mareógrafo, Bilbao histórica, Observatorio de San Sebastián y Oviedo Universidad en los años que se especifican en el cuadro, y que corresponden a periodos sin cambios de emplazamiento en la estación. El peso relativo asignado a las estaciones alejadas es bajo, por lo que estos datos contribuyen poco a la determinación de la serie de Reinosa.

Mientras que para completar la serie de Santander se ha podido escoger otras emplazadas principalmente en núcleos de población de tamaño medio o grande, en términos relativos, en el caso de Reinosa los observatorios se encuentran mayoritariamente en pequeños núcleos rurales, donde la instalación ha estado condicionada en ocasiones, por un interés coyuntural sobre el conocimiento de las condiciones pluviométricas de un área. Así ocurrió entre 1975 y 1990 con

las estaciones de los cañones del Ebro, en el norte de Burgos, que se pusieron en marcha para estudiar la viabilidad del aprovechamiento hidroeléctrico del río, y una vez satisfecha la necesidad se cerraron los observatorios. Otro ejemplo semejante se aprecia en las series de Campoo, puestas en marcha en fecha muy temprana durante los estudios previos a la construcción del Embalse del Ebro, y que pronto se interrumpieron.

Hay que mencionar que en estos observatorios de la red complementaria de observación, nos encontramos con algunas peculiaridades. A menudo, pequeños desplazamientos de la estación dentro de la población no se han considerado relevantes, y no han sido documentados. En otras ocasiones, la responsabilidad de la toma de datos se ha compartido entre varias personas, miembros de la misma familia o vecinos, con distinto grado de compromiso con la tarea encomendada. Tanto los desplazamientos de los sensores, como los cambios de responsable, se reflejan en las series con periodos más o menos largos en los que la observación se interrumpe. Como no siempre se dispone de la información necesaria para documentar estas interrupciones, se ha optado por dividir las series que presentaban lagunas largas, para tratarlas como provenientes de distintas poblaciones de datos. En estos casos, se ha modificado el nombre añadiéndole un número al final, puesto que el resto de los atributos de la estación permanecen iguales.

Tabla 3.1. Observatorios seleccionados para construir la serie de referencia de Santander.

INDICATIVO	NOMBRE	UTM X	UTM Y	ALTITUD (M)	PERIODO CUBIERTO	PERIODO UTILIZADO	NOTAS
1110	SANTANDER "CENTRO"	433756	4812837	64	1923-1997	1923-1997	
1111	SANTANDER "CMT"	435335	4815814	52	1946-2007	1946-1962	A
1110B	SANTANDER "BOMBEROS"	435685	4812478	14	1912-1919	1912-1919	
1110A	SANTANDER "INSTITUTO"	435798	4812508	20	1920-1923	1920-1923	
111B	SANTANDER MAREÓGRAFO	434760	4815974	14	1901-1916	1902-1914	B
1109	AEROP. DE SANTANDER	433671	4808796	6	1953-2006	1953-2000	
1246	OVIEDO (UNIVERSIDAD)	269353	4805248	248	1851-1936	1900-1934	
1247	OVIEDO (LA CALELLADA)	270863	4806586	220	1941-1985	1941-1985	
1207U	GIJON(CABUEÑES)	287271	4823189	10	1975-1995	1975-1994	
1208	GIJON (FERIA DE MUESTRAS)	286535	4824078	3	1976-2001	1976-2000	
1208A	GIJON (LA MERCED)	284520	4823586	22	1938-1976	1938-1976	
1208E	PINZALES DE GIJON	280161	4818786	45	1971-2006	1971-2000	
1203	LASTRES	316402	4820478	93	1945-1979	1945-1978	
1206	VILLAVICIOSA	302597	4817164	10	1967-1996	1967-1996	
1206A	VILLAVICIOSA_A	302812	4816488	20	1968-1998	1968-1998	
1182E	VIDIAGO	365088	4806208	60	1971-2006	1971-2000	
1159	S.V.BARQUERA (FARO)	387358	4805646	39	1951-2007	1966-1988	
1083G	ONTON	485885	4800402	80	1972-2007	1972-1985	
1086	LAREDO	466778	4806022	80	1967-2007	1972-2000	
1082	AEROP. DE BILBAO	507639	4794006	39	1947-2000	1947-2000	
1068	BASAURI	509476	4784969	81	1944-1979	1944-1979	
1059	PUNTA GALEA	498425	4802547	90	1946-2006	1946-1969	
1032A	VILLABONA_A	577206	4781698	50	1944-1975	1944-1975	
1032	VILLABONA	575599	4782081	172	1925-1987	1925-1987	
1024E	SAN SEBASTIAN (IGUELDO)	577906	4795498	252	1916-2007	1928-2000	
1024F	SAN SEBASTIAN (OBSERVATORIO)	581093	4796553	23	1901-1936	1901-1936	C
1024B	FARO DE IGUELDO	580340	4797316	122	1916-1992	1916-1927	
1014	AEROP. DE FUENTERRABÍA	598035	4801221	8	1956-2007	1957-2000	
1015	FUENTERRABIA	595881	4802301	80	1943-1964	1944-1964	
1057C	MACHICHACO FARO VIEJO	519913	4811399	70	1916-1928	1916-1928	
1035	LASARTE	579436	4791813	85	1945-2006	1946-2000	
1013	IRUN	598636	4798638	5	1913-1972	1913-1931	D
1013	IRUN_2	598636	4798638	5	1913-1972	1935-1965	D
1115	PUENTE ARCE	423820	4806678	13	1951-1991	1961-1991	
1129	CASTAÑEDA	423030	4796505	121	1956-1992	1961-1991	
1077C	BILBAO HISTÓRICA	505253	4789900	17	1856-1920	1900-1920	C

A. Situado en el barrio de Cueto de Santander, frente al mar. En 1997 el Centro Meteorológico ocupó el solar del Semáforo de Cabo Mayor, en funcionamiento entre 1946-1964.

B. Elaboración propia; datos inéditos.

C. Las correcciones de los datos son del Instituto Nacional de Meteorología. Publicación A-143.

D. Por la ausencia de datos, dos tramos de la misma serie se consideran series distintas.

Tabla 3.2. Estaciones usadas para la elaboración de la serie de referencia de Reinosa.

INDICATIVO	NOMBRE	UTM X	UTM Y	ALTITUD (M)	PERIODO CUBIERTO	PERIODO UTILIZADO
9002	ABIADA	394812	4763745	1163	1928-1934	1928-1934
2244	AGUILAR DE CAMPOO	396700	4738693	897	1931-1967	1931-1968
9012	ARIJA	422553	4760475	850	1945-1997	1968-1996
9008	ARROYO DE VALDEARROYO1	413688	4757866	845	1928-2007	1928-1933
9008	ARROYO DE VALDEARROYO2	413688	4757866	845	1928-2007	1951-1978
9015	BARCENA DE EBRO	415115	4745044	740	1958-1989	1958-1990
2241	BARRIO DE STA. MARIA	387209	4741928	962	1963-1992	1963-1993
2246	BARRUELO1 DE SANTULLAN	394484	4751223	1040	1923-1997	1931-1944
2246	BARRUELO2 DE SANTULLAN	394484	4751223	1040	1923-1997	1951-1997
9022	BASCONCILLOS DEL TOZO	416431	4728060	914	1973-1988	1973-1988
2245	BRAÑOSERA	393199	4754637	1209	1939-1977	1942-1972
9008X	CABAÑAS1 VIRTUS	430756	4763102	858	1926-2005	1926-1934
9008X	CABAÑAS2 VIRTUS	430756	4763102	858	1926-2005	1949-2000
9016	CASTRILLO DE VALDELOMAR	408408	4739145	840	1967-2007	1967-2000
2234	CERVERA DE PISUERGA	377529	4746875	1013	1912-2007	1921-2000
9020	CILLERUELO DE BRICIA	430958	4749464	1000	1949-1974	1949-1974
9016U	CUBILLO DE EBRO	415577	4740133	772	1973-2007	1974-2000
9028E	CUBILLOS DEL TOZO	440952	4753566	956	1928-1988	1973-1988
9005	ESPINILLA	400069	4764006	937	1945-1974	1945-1974
9023U	LA RAD DEL TOZO	424999	4724969	980	1973-1988	1973-1988
9014O	LOS CARABEOS	410959	4751915	960	1973-1988	1973-1988
9024	MASA2	441026	4719724	1006	1928-1988	1973-1989
9006O	MATAMOROSA	405629	4760070	850	1976-1988	1973-1990
9020I	ORBANEJA DEL CASTILLO	435138	4742852	705	1973-1988	1973-1991
9015C	OTERO DEL MONTE	415878	4742443	940	1986-2007	1986-2000
2243	PANTANO DE AGUILAR	395201	4738747	903	1960-2006	1960-2000
9011O	POBLACION DE YUSO1	422987	4764789	860	1926-2007	1926-1936
9011O	POBLACION DE YUSO2	422987	4764789	860	1926-2007	1974-1987
9011O	POBLACION DE YUSO3	422987	4764789	860	1926-2007	1991-2000
9019	POLIENTES	423070	4739830	716	1960-2002	1960-2000
9028K	PORQUERA DE BUTRON	444468	4739902	1010	1952-1988	1973-1988
9001	REINOSA	407236	4761652	855	1911-1994	1911-1994
9018U	RUANALES	425315	4749955	903	1973-1994	1974-1988
2240	SAN MAMES DE ZALIMA	388947	4744059	960	1933-2000	1933-2000
9027	SARGENTES2 DE LORA	428595	4735883	1025	1928-1991	1949-1991
9026A	SEDANO	438675	4729524	780	1928-1988	1974-1988
9012U	SERVILLEJAS	417823	4764479	907	1973-1988	1973-1988
9025	TABLADA DE RUDRON	431111	4730706	749	1950-1988	1973-1988
9008E	VILLASUSO	416941	4762669	864	1968-2002	1968-2000
1111B	SANTANDER MAREOGRAFO	434760	4815974	14	1900-1914	1900-1914
1246	OVIEDO (UNIVERSIDAD)	269353	4805248	248	1900-1934	1900-1934
1024F	SAN SEBASTIAN (OBSERVATORIO)	581093	4796553	23	1901-1936	1901-1936
1177C	BILBAO HISTORICA	505253	4789900	17	1900-1920	1900-1920
2327	BURGOS HIST	442328	4687107	860	1900-1950	1900-1950
9901F	HUESCA HIST	714893	4667935	500	1900-1950	1900-1950
9262A	PAMPLONA	610368	4741425	463	1900-1950	1900-1950

La elaboración de las series homogéneas de referencia de Santander y Reinosa se ha hecho por interpolación espacial. El método consiste en obtener una serie de referencia, mediante la combinación de un conjunto de series, cuyos valores se ponderan en función de la distancia que las separa del observatorio cuyas lagunas queremos rellenar y homogeneizar. Se ha utilizado el módulo *Climatol* (Guijarro, 2004). La hipótesis de partida es que las variaciones de la señal climática son consistentes en el tiempo y en el espacio. Es decir, que observatorios vecinos registran, en momentos determinados, variaciones semejantes de las variables atmosféricas. Asumir esta hipótesis permite hacer análisis de homogeneidad relativa, comparando las variaciones de los registros de las series con otros que provienen de series de referencia, pues las variaciones afectarán de la misma manera a ambas series (Conrad y Pollack, 1962). En particular, las series de referencia se han calculado en este trabajo como promedio del conjunto de series vecinas, ponderando los términos en función del inverso de la distancia a la que se

encuentran de la serie a estudiar. Previamente, se depuraron los datos y se procedió a la corrección de errores puntuales y al relleno de lagunas. También se ha evaluado la estacionariedad de la serie a través del cálculo de la t de Student en ventanas móviles de 10 y 20 términos. Todas estas rutinas de depuración se han ejecutado varias veces, ajustando el valor de los pesos de las series participantes, y desechando aquellas que mostraban rasgos acusados de no ser estacionarias. Los valores de la función de ponderación también se han ajustado en cálculos sucesivos en función de los resultados buscados. El resultado es un conjunto de series completas entre 1900 y 2000 susceptibles de ser tratadas estadísticamente como series temporales.

Una vez que se han completado las dos series se aborda la detección de saltos y tendencias. Para ello, las series mensuales calculadas se han sometido a los test de Pettitt (Pettitt, 1997). La serie de Santander, presentó un punto de ruptura en 1930 que se pudo documentar como un cambio en la forma de calcular la precipitación acumulada. A partir de este momento, el dato de precipitación acumulada mensual se calcula como suma del dato diario. Por su parte, la serie de Reinosa presentó una ruptura en 1976, que corresponde con el fin de la serie que comenzó en 1911. La prolongación de las observaciones a partir del año 1979 presenta muchos problemas de inconsistencia con los observatorios del entorno, lo que obligó a reproducir los cálculos sólo con los datos del primer periodo. El cambio de emplazamiento de 1930 no tiene reflejo en los test aplicados a la serie anual. Para el control de tendencias se ha elegido el test no paramétrico de Mann-Kendall, posiblemente el más extendido en el análisis climatológico para la estimación de la tendencia. Por último se ha ejecutado el test SNHT (Alexanderson, 1996) para las series de Santander y Reinosa frente a Bilbao y San Sebastián, consideradas homogéneas y de referencia en este periodo.

3.3. Serie de Referencia de Precipitación para Santander

La serie de precipitación acumulada anual y las series mensuales para Santander presentan unos valores aceptables de independencia, normalidad y falta de tendencia, sin puntos de ruptura en las distintas series. La falta de homogeneidad absoluta que pone de manifiesto el test de von Neumann en la serie anual está próximo al valor 1.96 asignado al nivel de significación 0.05. En el caso de las series mensuales, noviembre y sobre todo junio, se alejan mucho del valor mínimo asignado al estadístico, y habría que aplicar un test múltiple al conjunto de las series para saber si estos valores son significativos. Las series de precipitación acumulada estacional obtienen valores aceptables en los diferentes test.

Con la intención de sintetizar los datos vamos a agruparlos en siete categorías, asignando un calificativo pluviométrico a cada mes o año, desde extremadamente húmedo hasta extremadamente seco, según el rango percentil que corresponda al dato dentro de la serie:

- *Extrem. Seco*: La precipitación registrada es menor que la del 95% de los casos.
- *Muy Seco*: Mayor que la anterior pero menor que la del 80% de los casos.
- *Seco*: Menor que la recogida el 60% de los casos y mayor que la anterior.
- *Normal*: La precipitación se sitúa entre el 40 y el 60%.
- *Húmedo*: La precipitación está por encima del 40% de los años o meses más húmedos, y no alcanza el 80%.
- *Muy Húmedo*: La precipitación está entre el 5 y el 20% de los periodos más húmedos.
- *Extrem. Húmedo*: La precipitación está entre 5% de los periodos más húmedos.

La serie cronológica de los años clasificados según este criterio se muestra en la Figura 3.1, y pone de manifiesto el ritmo alternante en la aportación pluviométrica anual; asimismo, con carácter general, esta alternancia se produce en pequeños conjuntos agrupados de dos o tres años, en los que se repite la categoría. Se puede por tanto afirmar que cuando se repite el

carácter anual más allá de tres años consecutivos se entra en un periodo poco frecuente de escasez o de abundancia, que tendrá reflejo a mayor escala temporal.

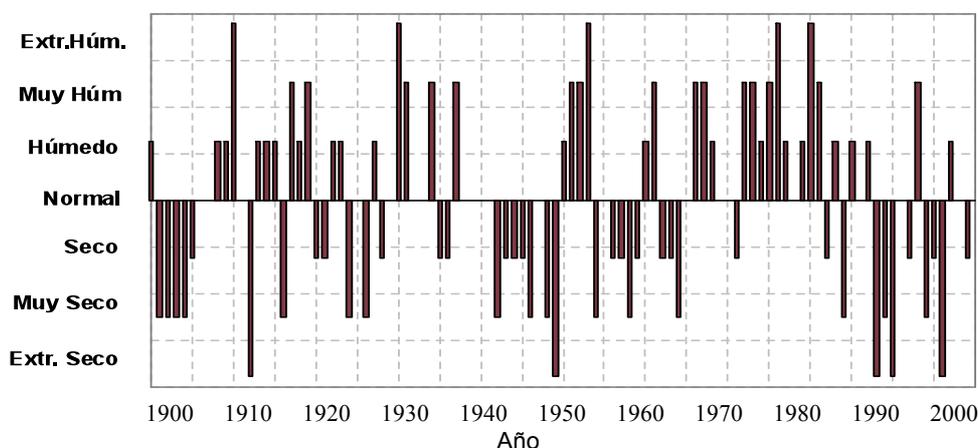


Fig. 3.1: Clasificación pluviométrica anual de la serie de referencia de Santander 1900-2000 en siete categorías.

Para facilitar la lectura de la clasificación de los datos mensuales, se han reducido a tres el número de categorías, que están recogidas en la Figura 3.2 de acuerdo al siguiente criterio. Las tres clases centrales, Seco, Normal y Húmedo, están agrupadas y dibujadas sin color de fondo. Las dos categorías superiores, de periodos más húmedos, se han dibujado en verde y las dos más secas en amarillo.

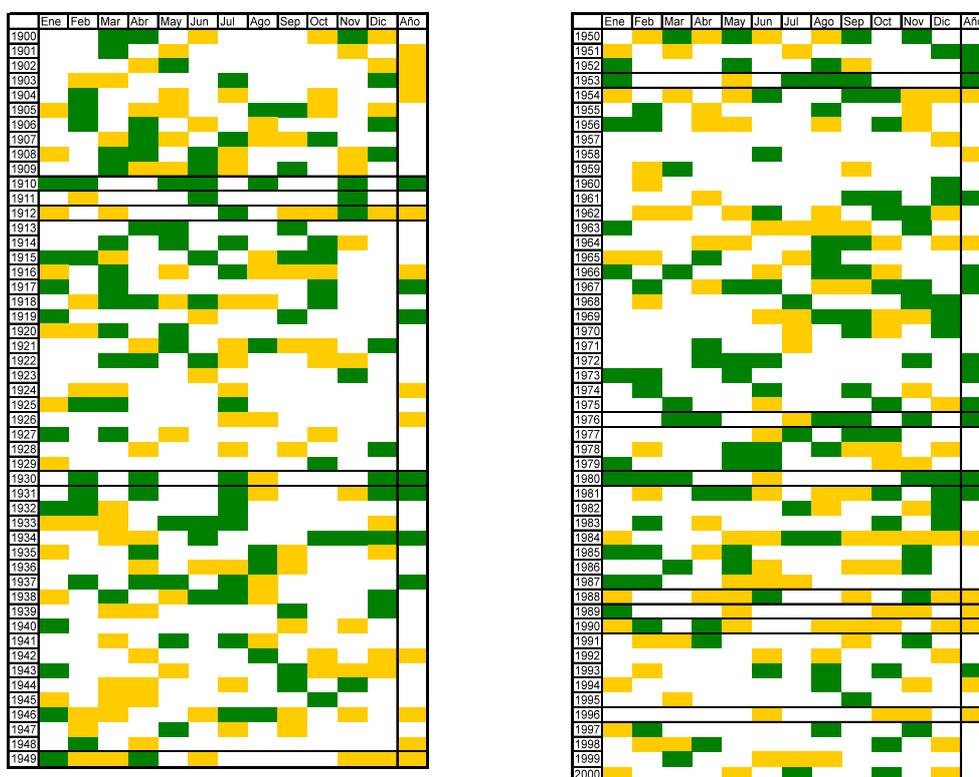


Fig. 3.2: Clasificación pluviométrica mensual y anual de la serie de referencia de Santander 1900-2000 en tres categorías (amarillo: seco, blanco: normal, verde: húmedo). Están resaltadas también las filas correspondientes a los años con precipitación extrema, por debajo del percentil 5 y por encima del 95.

En estas figuras se ven reflejados los principales periodos del siglo. En concreto, los años secos de la década de los 40, y los que abarcan del año 1985 hasta el 2000, caracterizados ambos por la presencia dominante de periodos normales o secos. También la fase húmeda prolongada desde la década de 1960 hasta 1981, en cuyos inicios se aprecia cierta concentración de meses húmedos en la segunda mitad del año, entre agosto y diciembre, que parece que se traslada al invierno y la primavera en la década de 1970. Una distribución parecida de meses húmedos se produjo también en la fase húmeda de los años 1930 a 1938, y también en los primeros veinte años del siglo, donde los meses especialmente lluviosos se concentraron entre el invierno y la primavera. Concretamente, la acumulación de periodos húmedos que se produce en los meses de marzo, abril y julio de la primera mitad del siglo, se traslada a agosto, septiembre, octubre y noviembre en la segunda.

Para analizar la presencia y aparición de las distintas categorías a lo largo del siglo, se procede a agruparlas por décadas. La Figura 3.3 es una tabla de contingencia agrupada del número de veces que aparece cada categoría de la clasificación pluviométrica anual, en una decena de años determinada. Cada columna hace referencia a una década del siglo XX. En cada una, se han representado en columnas superpuestas, de acuerdo con los colores de la leyenda, las categorías de la clasificación pluviométrica. La longitud de cada segmento de color es proporcional al número de años de la década clasificados con esa categoría.

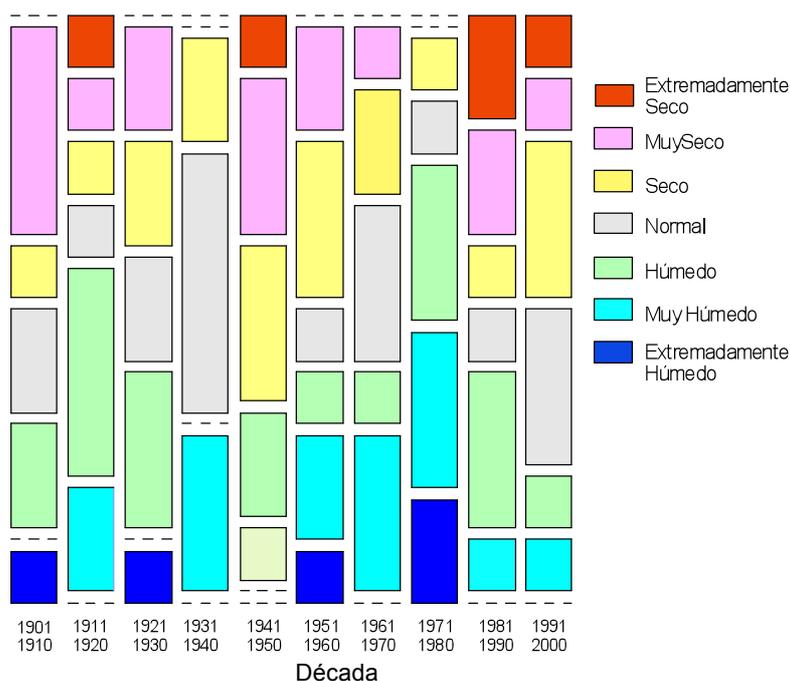


Fig. 3.3: Carácter pluviométrico de la serie anual de referencia de Santander 1900-2000 en décadas.

Una mirada rápida sobre este esquema gráfico nos permite apreciar cómo, en términos de precipitación acumulada anual, los máximos aparecen con mayor frecuencia en la segunda mitad del siglo.

3.4. Serie de Referencia de Precipitación para Reinosa

Los resultados con la serie de Reinosa pusieron de manifiesto un punto de corte obtenido en 1944, según el test de Pettitt y según el SNHT, tomando como referencia la serie de Santander.

No se han encontrado razones que justifiquen la rotura de la serie anual en este punto, por lo que se decidió considerar la serie sin modificaciones. Al igual que en el caso anterior hemos procedido a representar las categorías de precipitación a lo largo del siglo XX.

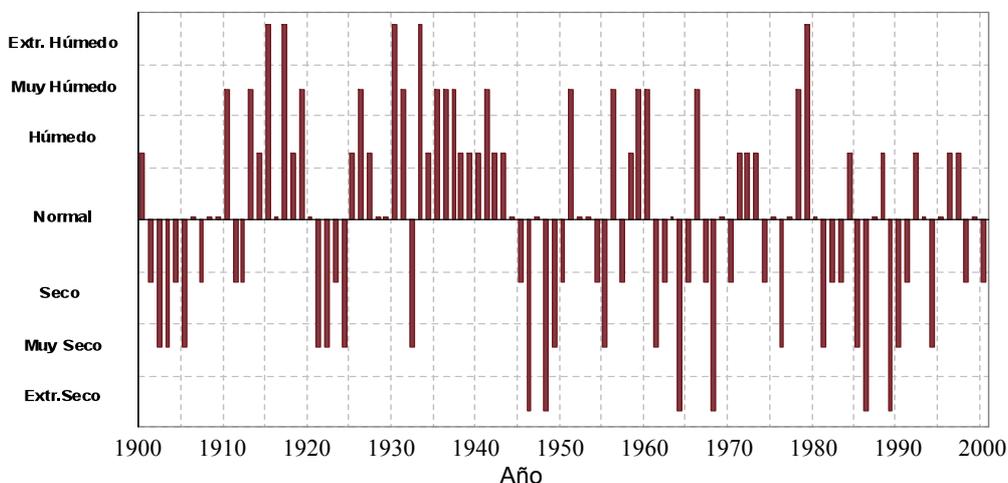


Fig. 3.4: Clasificación pluviométrica anual de la serie de referencia de Reinosa 1900-2000 en siete categorías.

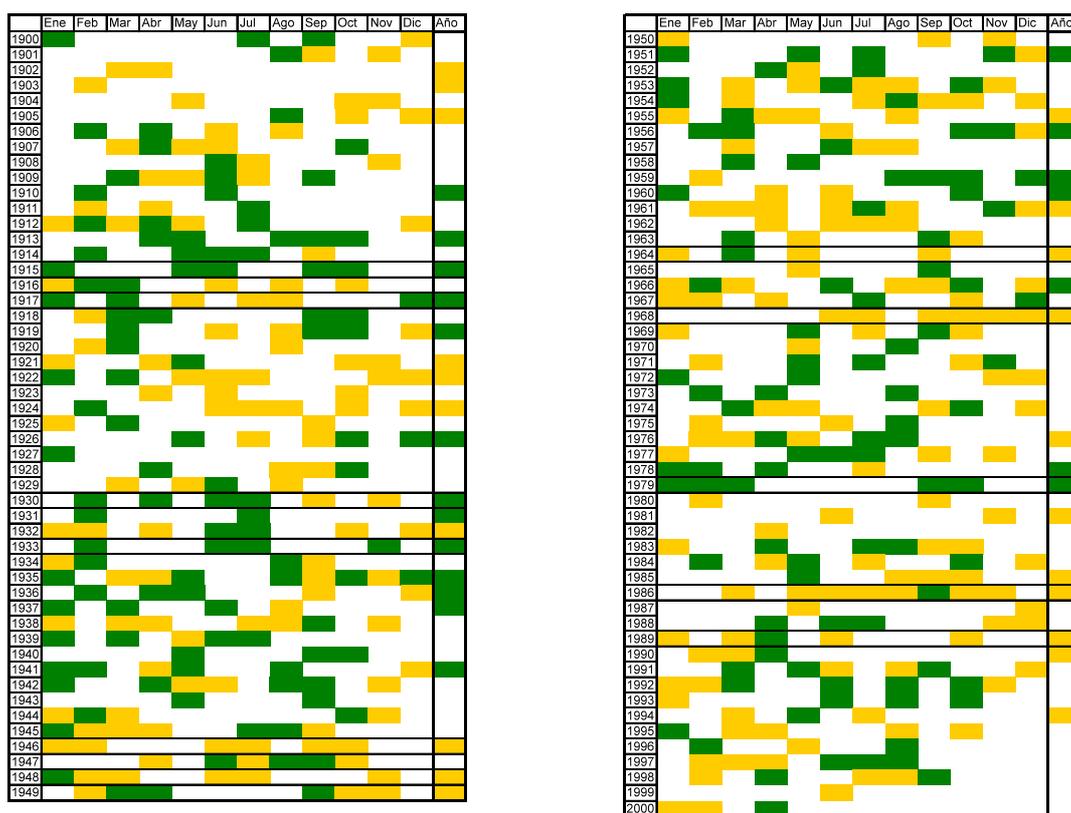


Fig. 3.5: Clasificación pluviométrica mensual y anual de la serie de referencia de Santander 1900-2000 en tres categorías (amarillo: seco, blanco: normal, verde: húmedo). Están resaltadas también las filas correspondientes a los años con precipitación extrema, por debajo del percentil 5 y por encima del 95.

Estas figuras ponen de relieve el carácter seco de la primera década del siglo y la mayor presencia de meses y años húmedos en la primera mitad del siglo; además es más frecuente encontrar periodos húmedos en el primer semestre del año. Sin embargo, no se aprecia el desplazamiento de los periodos húmedos entre el primer y el segundo semestre del año, conforme avanza el siglo, como se veía en la serie de Santander.

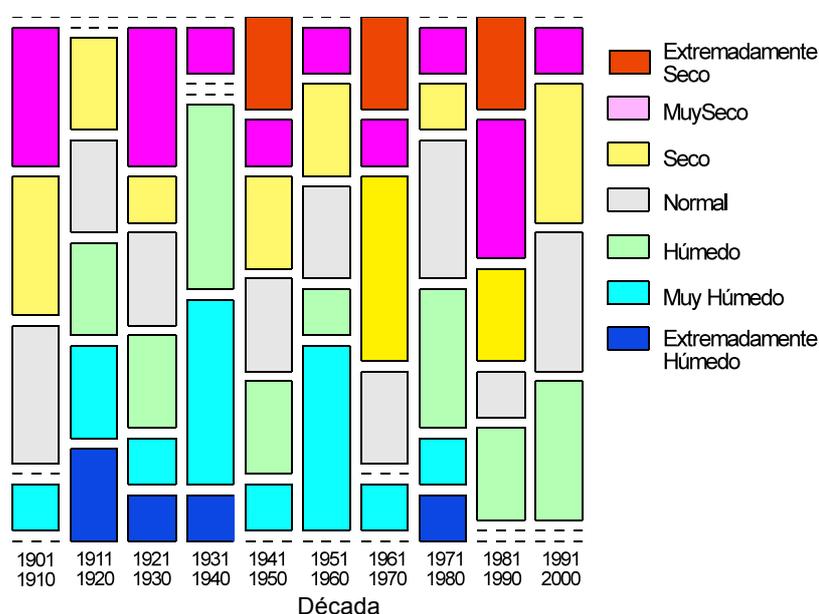


Fig. 3.6: Carácter pluviométrico de la serie anual de referencia de Reinosa 1900-2000 en décadas.

Al igual que en el caso de Santander, los máximos de precipitación acumulada anual aparecen con mayor frecuencia en la segunda mitad del siglo.

3.5. Series de Referencia para Temperaturas: Datos y Metodología

Al contrario que la precipitación y su distribución discontinua en el tiempo y en el espacio, la temperatura toma un valor medible en cualquier momento, y en cualquier punto del espacio. La temperatura del aire, que es la que interesa a la climatología, ha de medirse en el interior de un pequeño recinto o garita que alberga los termómetros. En nuestro caso, las observaciones están recogidas en garitas de la red de observación de AEMET y en el caso de los datos antiguos de la estación del Mareógrafo de Santander, aunque no conocemos las características exactas del abrigo, sí sabemos que era una garita de madera, y que se encontraba a unos metros por delante del muro norte del edificio. En la primera revisión de las series disponibles se han eliminado las series que pudieran presentar problemas por la instalación incorrecta de la garita.

En el presente trabajo nos centramos en la temperatura media mensual y deduciremos de ella la temperatura media anual. Las temperaturas medias se calculan a partir de las series de temperaturas máximas y mínimas diarias, lo que obliga a repetir el cálculo dos veces y a revisar independientemente ambas. Por ejemplo, los problemas asociados a la incorrecta ventilación u orientación del abrigo termométrico son menos acusados en las series de mínima que en las de máxima, por estar éstas afectadas por la insolación directa.

Se mantiene la idea de que una selección amplia de estaciones diluye las peculiaridades locales y facilita la consecución de una serie representativa. La temperatura, aunque es variable continua, está muy influida por la altitud y otras características topográficas del

observatorio. Al considerar valores medios mensuales, sin embargo, estas peculiaridades se atenúan. Por ello, se ha procedido como en el caso de la precipitación, agrupando observatorios afines a priori estableciendo tres círculos inicialmente en el litoral: Oviedo, Santander, Bilbao que reduciremos luego a uno para llegar a la serie de Santander; y uno en torno a Reinosa, que completaremos con registros históricos de Burgos, Vitoria, Oviedo, Pamplona y Huesca.

Para la serie de Santander, en Asturias hemos seleccionado las estaciones de acuerdo al año de inicio de la recogida de datos, el año de finalización, el número total de datos, la altitud y la presencia de otras series cercanas contemporáneas. De acuerdo a estos criterios se eligieron las de inicio más antiguo, con un mínimo de 100 datos y situadas a menos de 250 m de altitud, de donde resultaron 33 emplazamientos que fueron objeto de una revisión individual más detallada. En Cantabria procedemos de manera semejante, por separado para Santander y Reinosa, aunque en la preparación de las series definitivas se mezclen estaciones de ambos conjuntos. Se han incluido observatorios como Villacarriedo, Ceceñas, e incluso Torrelavega, cuyos emplazamientos no se parecen fisiográficamente a los de la capital, pero que son lo bastante largos como para aportar información sobre la evolución paralela de las series. Las estaciones del País Vasco se ordenan por la fecha de inicio de la serie, y se filtran por altitud menor de 253m que permite incluir Igueldo, con más de 100 datos, cercanos al litoral (al norte del paralelo 43° 10'). Luego se han unido los observatorios de Álava con datos más antiguos y series más largas.

En la selección de estaciones para la homogeneización de la serie de Temperatura de Reinosa se ha estimado la proximidad y la altitud, principalmente. Se han establecido los cortes en 700 m de altitud y 28 km de distancia, resultando más de 25 estaciones. En la selección de estaciones próximas a Reinosa de comunidades limítrofes, se han tomado las que inician la actividad antes de 1930 y distan menos de 100 km (Burgos) y a partir de esta fecha se ha limitado a 50 km la distancia. Hemos conservado Alar, Olmos, Espinosa y Villarcayo porque son series largas con años completos. Aunque están lejos y las dos primeras pertenecen a ambientes geográficos distintos, preferimos hacer un análisis detallado de la serie antes de desecharla, si fuera preciso. Se aprecia la falta de representación de estaciones en las Merindades, Loras, Cañones del Ebro, páramo de Masa, y en las comarcas limítrofes de la provincia de Burgos.

La técnica reproducida para el cálculo es la misma que en el caso de precipitación y se ha realizado utilizando el paquete *Climatol*.

3.6. Serie de Referencia de Temperaturas para Santander

La reconstrucción de serie de Santander a partir de la del observatorio provincial de la calle General Dávila, presenta en el tramo final una fuerte ruptura que la hace estadísticamente poco adecuada para tomarla como referencia. Del estudio y evaluación de los elementos que producen la rotura de la independencia de la serie, se observa que la causa recae principalmente en un incremento de las temperaturas máximas de los meses de verano. Junto con la fecha de ruptura, fijada por el test de Pettitt en 1979, parece posible atribuir la ruptura a la urbanización del entorno del observatorio que se lleva a cabo a partir de esa fecha. A partir de estas consideraciones, la serie que tomamos como referencia es la reconstruida a partir de las observaciones de la estación de Santander Ojaiz, una localidad de la periferia urbana, que no ha sufrido los efectos de la expansión urbanística y dista unos 7 km del antiguo observatorio provincial.

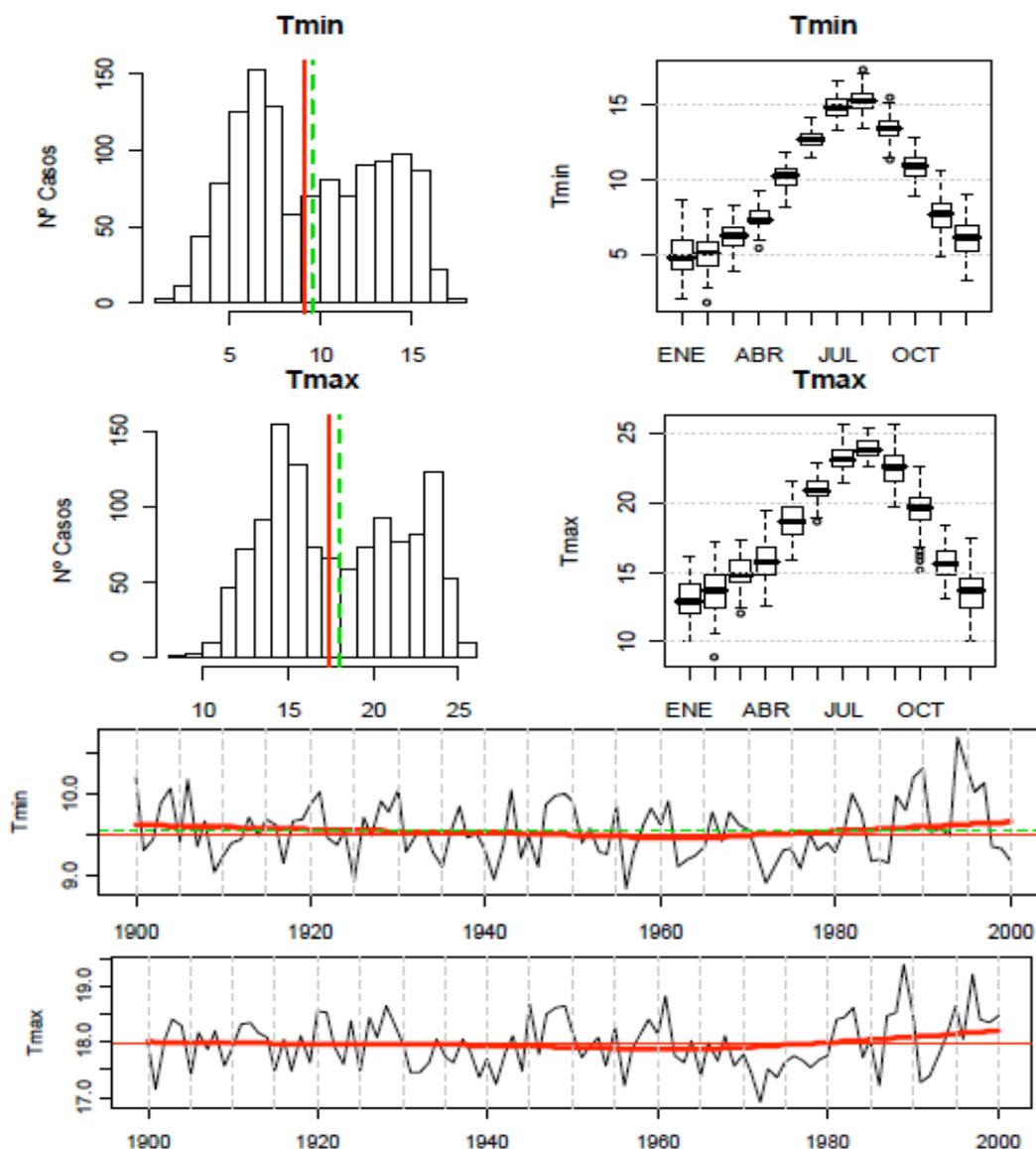


Fig. 3.7: (Arriba) distribuciones mensuales de temperaturas mínima y máxima en Santander (la línea roja indica la mediana y la verde la media); (abajo) series temporales anuales con tendencias locales ajustadas por un modelo lineal (en rojo).

La Figura 3.7 muestra la distribución y la serie temporal de las temperaturas máxima y mínima resultantes. El siglo presenta una primera mitad de signo alternante, con poca persistencia, salvo los cortos periodos de los años 30 y 40, frío y cálido, por contribución respectivamente de otoños y primaveras. No aparecen extremos cálidos, y los fríos se registran a un ritmo regular de 15 años aproximadamente. En la segunda mitad del siglo hay dos fases de signo opuesto que se prolongan casi 20 años cada una. La primera de carácter frío dura entre 1960 y 1980, y alcanza el punto álgido en la década de 1970. Esta fase queda mejor caracterizada como un periodo prolongado de frío que por haber alcanzado valores térmicos extraordinariamente bajos. La segunda fase, de 1980 a 2000, no resulta tan uniforme, y queda mejor descrita por lo extraordinario de las temperaturas alcanzadas. A este carácter, contribuye en especial la repetida ocurrencia de otoños extremadamente cálidos, acompañados con frecuencia por veranos e inviernos de parecido signo.

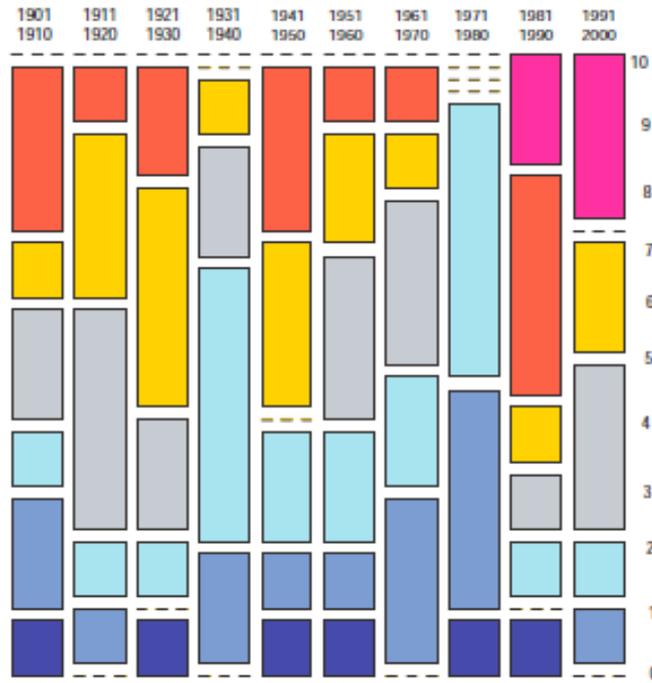


Fig. 3.8: Clasificación térmica anual de Santander agrupada por décadas, considerando la misma división en categorías expuesta en las secciones anteriores.

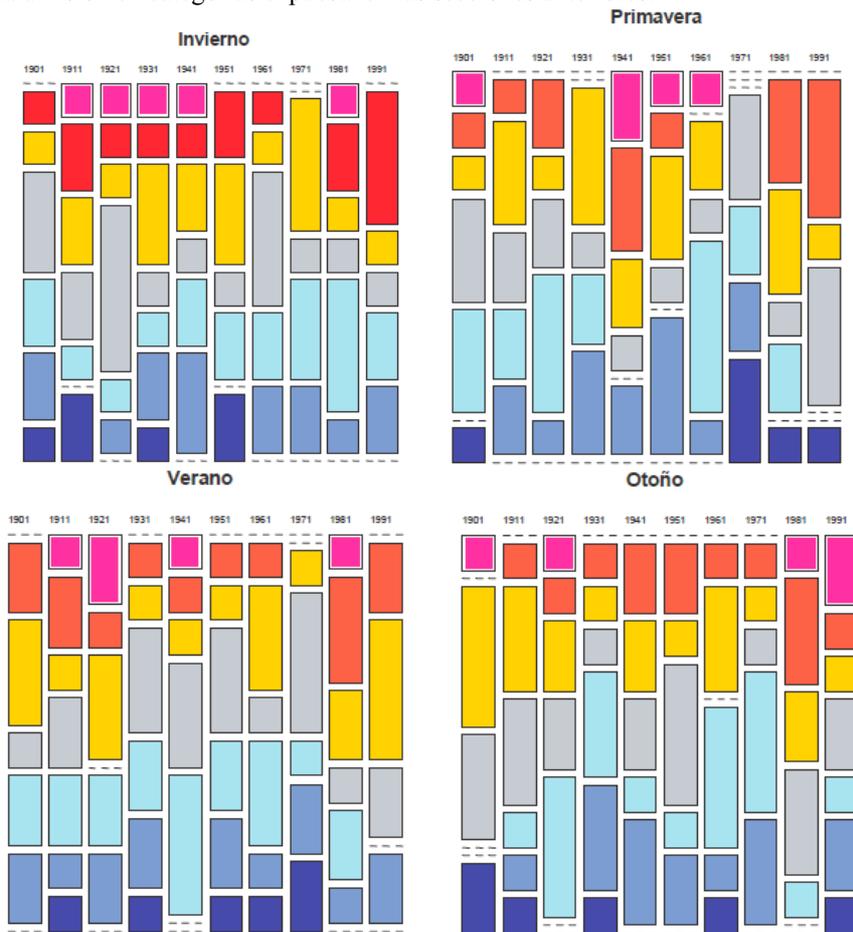
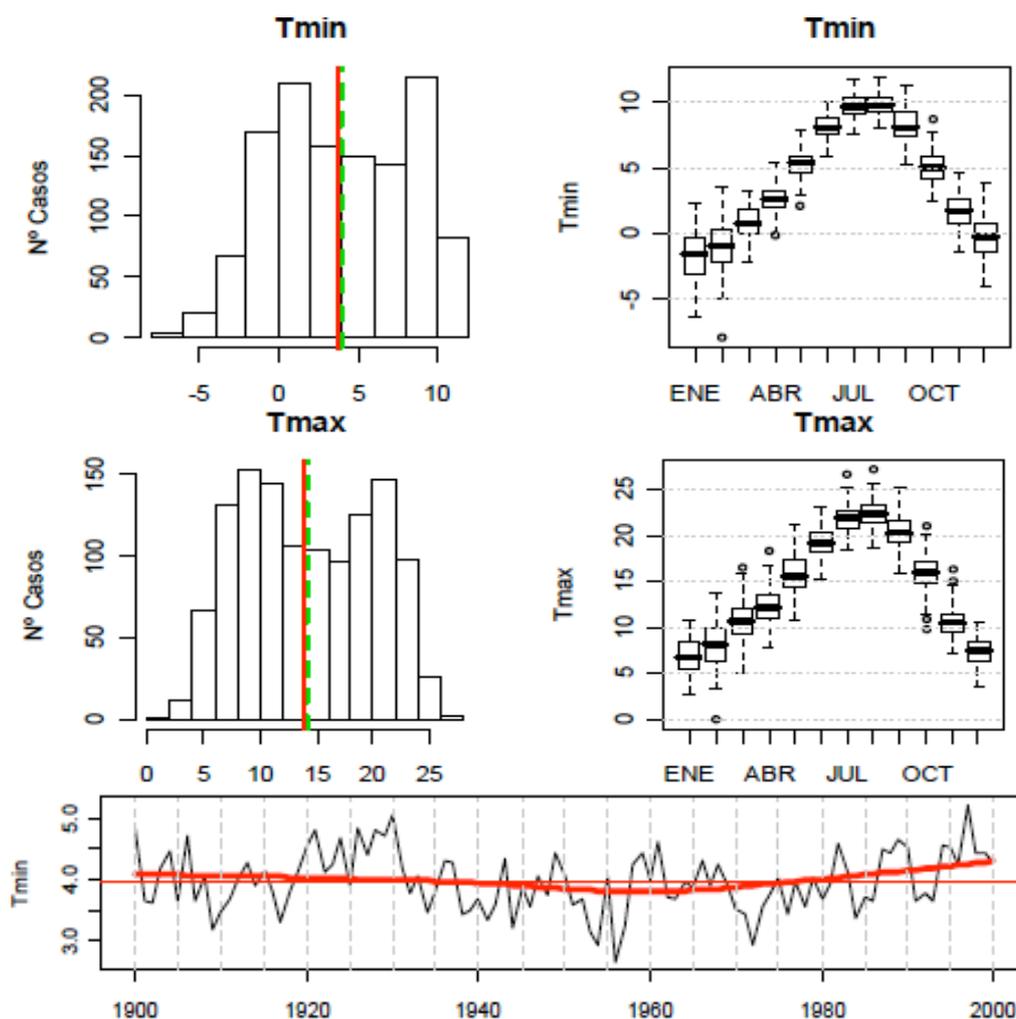


Fig. 3.9: Como la Figura 3.8 pero por estaciones del año.

La Figura 3.8 analiza la evolución secular por decenios, mostrando el dominio de los periodos frescos sobre los cálidos durante los años 30, 50, 60 y, muy acusadamente, los años 70. En estos últimos diez años no hubo ninguno cuya temperatura media estuviera próxima a la mediana. La compensación llegaría en las dos décadas siguientes, de predominio cálido y que agrupan los valores más altos de la serie secular. En un análisis estacional (Figura 3.9), se observa que se acumulan en las dos últimas décadas un número muy alto de episodios cálidos en todas las estaciones, y en particular en el otoño. La severidad de los años 70, sin embargo, hay que atribuirla a una prolongación del régimen térmico del invierno que se pone de manifiesto en que no hay una sola primavera de carácter cálido a lo largo de la década.

3.7. Serie de Referencia de Temperaturas para Reinosa

Las características de la serie de Reinosa, su emplazamiento y el reconocido cuidado con el se recogieron los datos entre 1911 y 1976, ofrece unas características de fiabilidad muy alta, y los resultados de los test así lo recogen, señalando el máximo del estadístico de Pettitt en 1931, fecha en que la estación cambió de emplazamiento. Los escasos 300 metros no influyeron de forma significativa en las series de promedio mensual o anual. La Figura 3.10 muestra la distribución y la serie temporal de las temperaturas máxima y mínima resultantes.



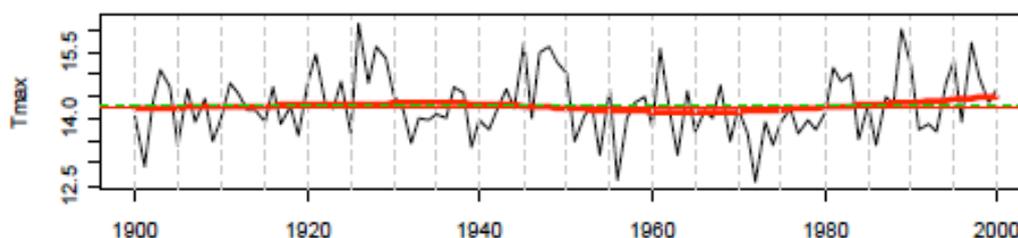


Fig. 3.10: (Arriba) distribuciones mensuales de temperaturas mínima y máxima en Reinosa (la línea roja indica la mediana y la verde la media); (abajo) series temporales anuales con tendencias locales ajustadas por un modelo lineal (en rojo).

El siglo se inicia con un ascenso térmico que culmina en la década de los años veinte. Desde aquí hasta los fríos años 70 la temperatura descende. En realidad sufre una oscilación fuerte y corta entre el cálido quinquenio de 1945 y 1950 y el frío intenso de los años 1955 y 1956. Es interesante reseñar que el ascenso final de las temperaturas en la década de 1980 y 1990 no han alcanzado, en promedio, los niveles de los primeros años cálidos del siglo. Y lo mismo ocurre si observamos las series estacionales. Sólo el invierno ha superado por arriba los registros de las primeras décadas. El otoño reproduce la evolución de las temperaturas medias anuales; y todas las estaciones coinciden en la posición del máximo térmico de 1925 y en la tendencia ascendente de los últimos años. La primavera por su parte, experimenta un notable enfriamiento hacia 1955, que contribuye sin duda a calificar los años 1951 a 1956 como muy fríos o extremadamente fríos. Los veranos de la primera mitad del siglo resultan cálidos. En promedio sobresalen los de la década de 1920, como en otras estaciones, pero a escala anual resultan extraordinarios en torno a 1945. Por último, el invierno se inicia con unos años de frío intenso, que va atenuándose hasta los años veinte. Cae después abruptamente durante los finales 30 y los primeros 40, para remontar progresivamente hasta el final de la serie, con la pausa de 1960.

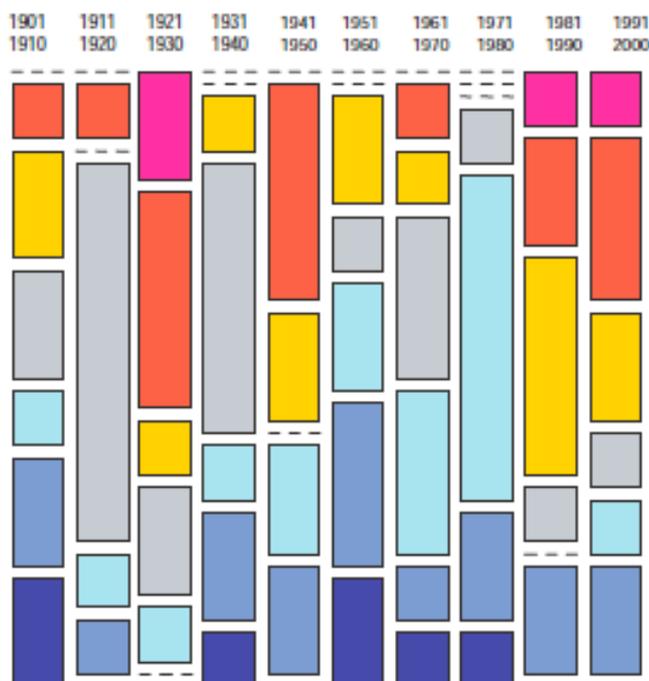


Fig. 3.11: Clasificación térmica anual de Reinosa agrupada por décadas, considerando la misma división en categorías expuesta en las secciones anteriores. Están representadas de abajo arriba, de frío a cálido, y donde aparece una línea discontinua debe interpretarse que la categoría correspondiente no está representada.

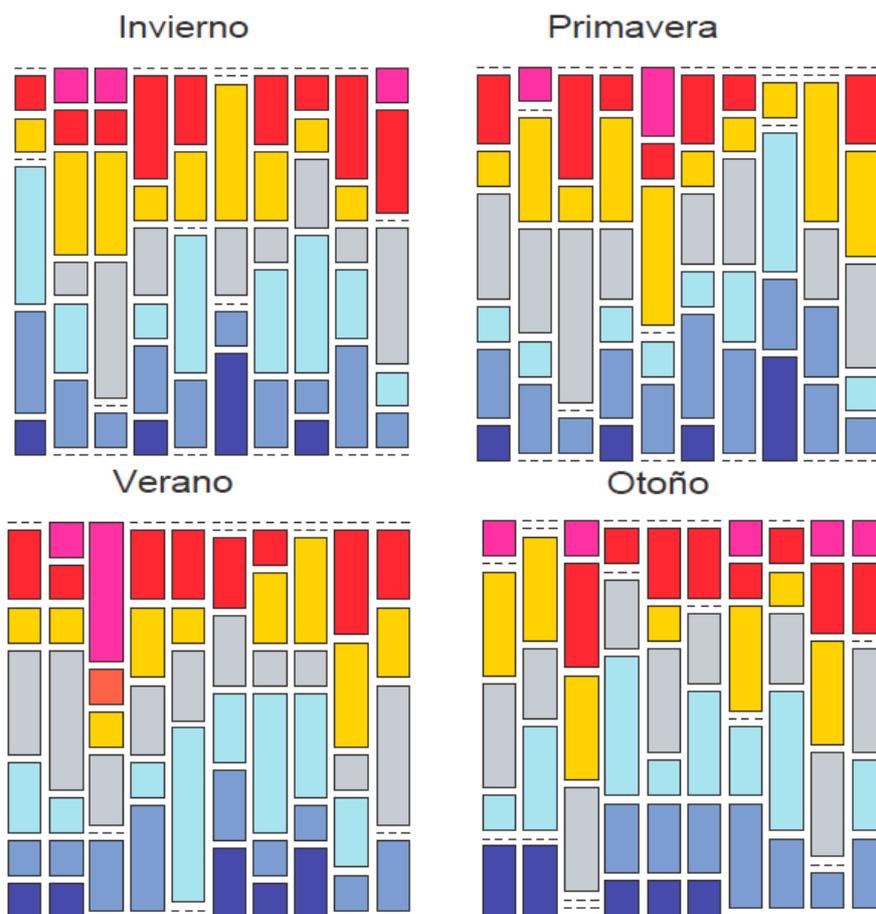


Fig. 3.12: Como la Figura 3.11 pero por estaciones del año.

La tendencia final positiva de la temperatura es común a todas las series analizadas, tanto de temperatura media, mínima o máxima y en cualquier zona de la región. También en Reinosa y en Santander la tendencia final es ascendente. Puede decirse que en los dos casos el siglo transcurrió levemente desequilibrado hacia valores frescos, con los años de frío extraordinario distribuidos con cierta regularidad. Sin embargo, los años más calurosos en el litoral se concentraron en las últimas décadas del siglo a causa de las elevadas temperaturas máximas alcanzadas a lo largo de todo el año, pero en especial en otoño. Por otro lado en Campoo, donde también los tibios inviernos de finales de siglo produjeron años extremadamente cálidos, el máximo absoluto del periodo 1900-2000 se alcanzó en los años 20, como consecuencia de una sucesión de veranos excepcionales. Respecto de los periodos fríos, los mínimos principales se sitúan en la misma fecha, en torno a 1972, y alcanzan parecida intensidad y duración. En los dos casos, además, obedecen a una sucesión de trimestres fríos.

El carácter marítimo de Santander atenúa la oscilación y la intensidad de los cambios en las temperaturas anuales. En general, los cambios de carácter cálido a frío son más frecuentes, pero menos intensos que en Reinosa. Aquí, se aprecia cierta persistencia en el carácter térmico anual, y oscilaciones más bruscas.

CAPÍTULO 4

Climatologías Interpoladas de Alta Resolución: 10 km y 1 km

Grupo Responsable:
Grupo de Meteorología (Instituto de Física de Cantabria, CSIC-UC)
sixto.herrera@unican.es

4.1. Introducción y Datos Utilizados

Como se ha visto en los capítulos anteriores, Cantabria es una región con grandes contrastes orográficos, que la confieren una gran variedad climática con un marcado gradiente meridional. La franja costera posee un clima atlántico templado y húmedo, con una temperatura media anual en torno a los 14°C, con una relativa homotermia debida al amortiguamiento de las temperaturas extremas por la proximidad del mar, y con precipitaciones acumuladas anuales de unos 1200 mm en promedio. A medida que nos adentramos en el interior de la región las condiciones climáticas atlánticas se van degradando con la altitud y con las condiciones locales de fachada y abrigo, dando paso a climas de transición a condiciones mediterráneas (oceánicos de verano seco) y climas de montaña.

Para poder caracterizar esta variabilidad climática de forma óptima, y poder regionalizar los escenarios globales de cambio climático, es necesario disponer de información meteorológica de alta resolución espacial (1km) y temporal (diaria) con cobertura espacial uniforme (por ejemplo, una rejilla interpolada de observaciones), para un período climático de referencia. Para ello, se han aplicado técnicas geoestadísticas apropiadas para generar una climatología de alta resolución en Cantabria para el período 1973-2003 en una rejilla regular de 1km, estimando también la incertidumbre/error asociado al método de interpolación. Esta tarea se ha realizado en dos fases:

- En la primera de ellas se han identificado las observaciones meteorológicas disponibles en el período 1950-2003 y se han probado distintos métodos estándar de interpolación para producir una climatología diaria homogénea en una rejilla regular de 10km de resolución (en esta fase se utilizan sólo las observaciones). La resolución de esta rejilla viene impuesta por la cobertura espacial de las estaciones disponibles.
- En la segunda fase se incorporaron covariables geomorfológicas (altura, orientación, insolación potencial, bloqueos, etc.) y se aplicaron métodos de regresión para reducir la resolución al objetivo final de 1km.

Para poder llevar a cabo esta tarea, es necesario disponer de un conjunto representativo de estaciones meteorológicas con registros históricos en un período de referencia. La Figura 4.1 muestra la localización de las estaciones de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), de Euskalmet y del grupo Grupo de Investigación en Estudio y Gestión del Medio Natural (GIMENA) de la Universidad de Cantabria utilizadas en el estudio. Dado que esta base de datos inicial es muy heterogénea tanto en la resolución temporal de sus series como en la distribución espacial de sus estaciones, fue necesario seleccionar un conjunto de estaciones cuya resolución temporal y espacial fuese lo más homogénea posible, evitando producir errores en las rejillas debidos a la mala calidad de los datos. Para ello, en este trabajo se partió de un subconjunto de estaciones de AEMET de calidad contrastada obtenido a partir del trabajo previo en la

descripción climatológica del Capítulo 2, añadiéndose además aquellas otras estaciones que resultaron ser homogéneas con este conjunto. Adicionalmente, se establecieron una serie de criterios de calidad para la selección de la base de datos:

- En primer lugar se eliminan los "outliers" (valores anormales) de las series, así como los valores negativos de precipitación y valores claramente erróneos.
- La serie debe tener al menos 20 años de observaciones en el periodo 1950-2003.
- La serie debe tener al menos 10 años con un porcentaje de datos superior al 90%.
- La serie de medias anuales no puede mostrar inhomogeneidades, ni absolutas ni relativas, a un 95% de confianza.
- Los tests de homogeneidad utilizados han sido el SNHT (Khaliq and Ouarda, 2007) para la absoluta y el test de Alexandersson (Alexandersson, 1986; Alexandersson and Moberg, 1997) para la relativa.

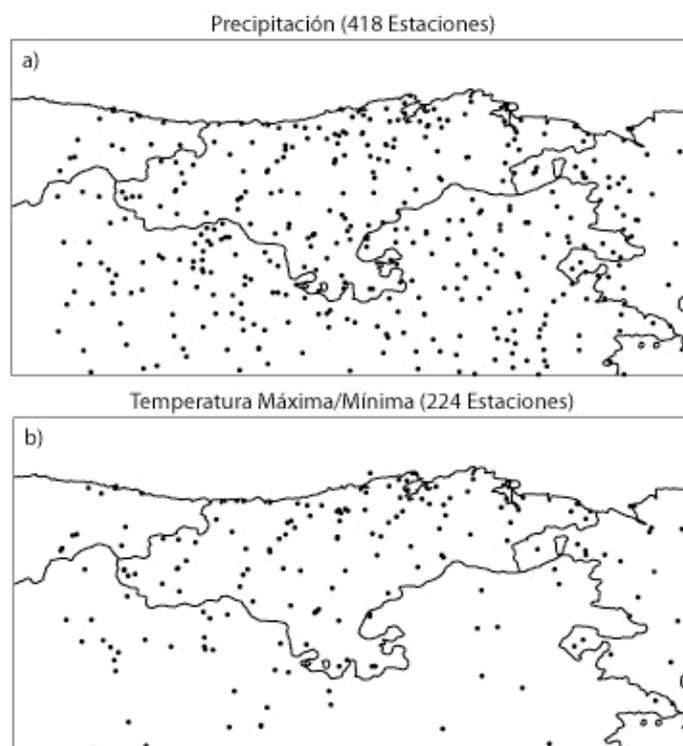


Figura 4.1: Situación de las estaciones meteorológicas para precipitación y para temperatura disponibles inicialmente en este trabajo.

Aparte de este control automático de calidad, a lo largo de la ejecución de todo el proyecto se han realizado distintas depuraciones puntuales de datos en estaciones que presentaban algún error en el proceso de interpolación o en el resultado final. También se han resuelto diversos problemas indicados por los colegas de AEMET en base a las diferencias más notables respecto de las climatologías de referencia mostradas en las Figuras 2.4-2.6.

Las Figuras 4.2 y 4.3 muestran la base de datos considerada finalmente para precipitación y temperatura, respectivamente, junto con las propiedades en términos de la cobertura temporal de cada una de las estaciones (para distintos umbrales de días faltantes cada año: 90% y 99%). También se muestra, en la última fila la evolución temporal del número de estaciones por año. En estas figuras se puede observar que a partir del año 1973 aproximadamente, el número de estaciones disponibles para precipitación se estabiliza (con un pequeño decaimiento al final del periodo), mientras que la temperatura muestra un incremento constante. Por tanto, se considera el periodo 1973-2003 como periodo de referencia climático para este proyecto.

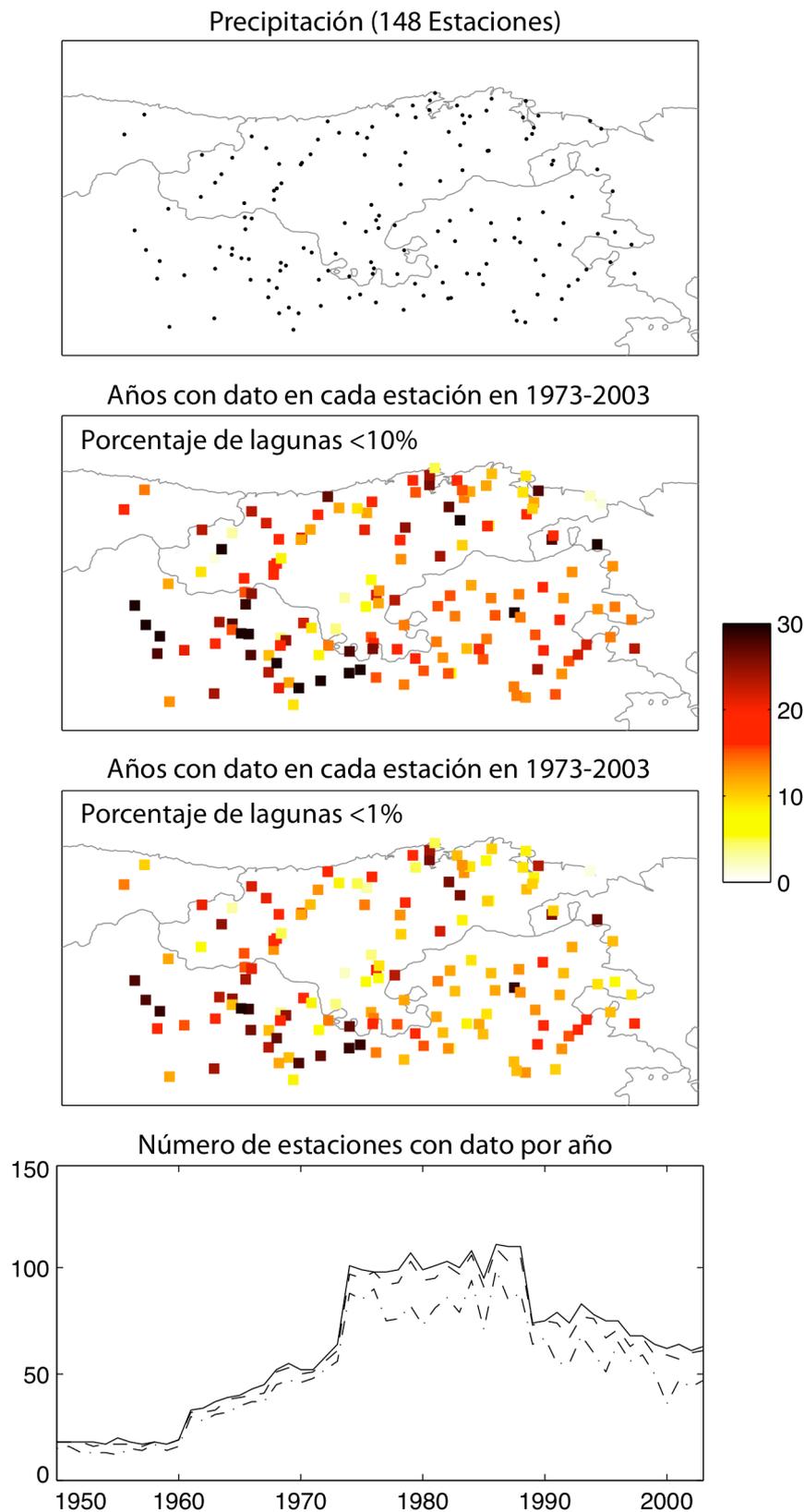


Figura 4.2: Estaciones consideradas finalmente para la obtención de la rejilla de precipitación. Los paneles centrales muestran el número de años con dato diario disponible (con cierto umbral máximo de lagunas permitido) en cada estación. El panel inferior muestra la densidad temporal de los datos.

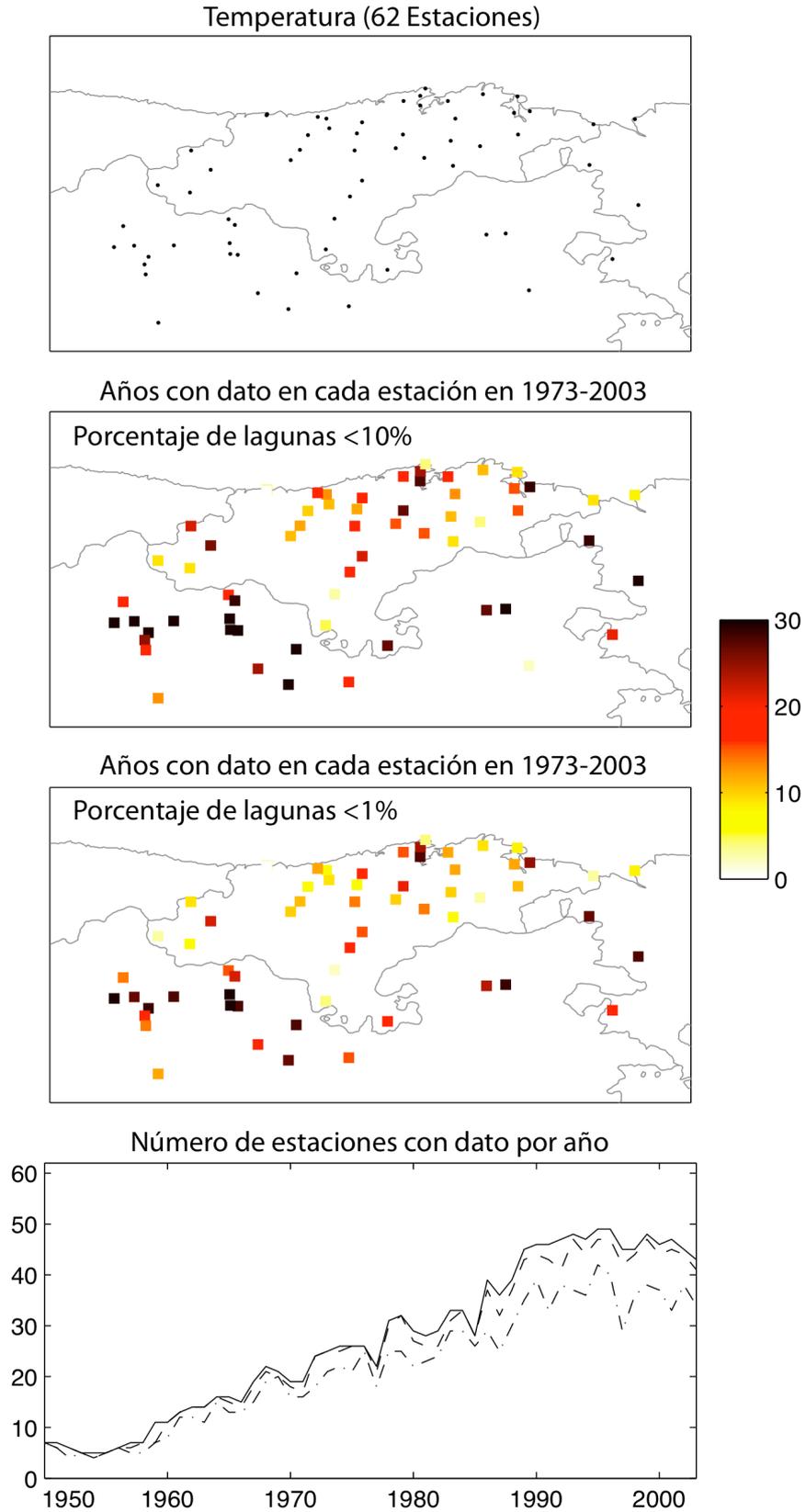


Figura 4.3: Como Figura 4.2, pero para temperatura (máxima y mínima).

4.2. Interpolación a la Rejilla de 10 km: Kriging

Como paso intermedio entre la red de observaciones y la rejilla final de 1 km de resolución, se estableció como primer objetivo la construcción de una rejilla con una resolución intermedia de 10 km, con la que calibrar el método de interpolación, y sobre la que analizar su incertidumbre (ver Fig. 4.4). En este caso, el objetivo era utilizar técnicas geoestadísticas apropiadas para interpolar a los distintos puntos de la rejilla los valores diarios de precipitación y temperatura observados en la red de estaciones, sin considerar otras variables auxiliares, como la orografía. Para ello, se estableció la resolución de 10km como un compromiso entre una máxima resolución y la adecuada cobertura espacial de las estaciones en la misma (en promedio debería de haber al menos una estación en cada punto de rejilla).

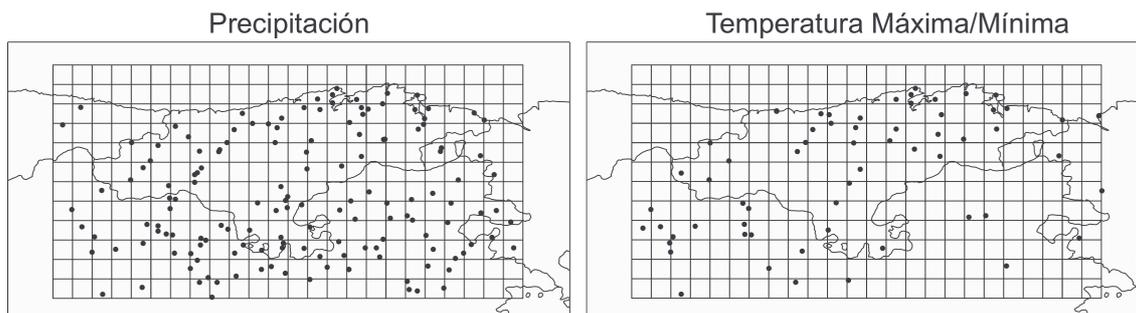


Figura 4.4: Grid de 10 km juntos con las estaciones de precipitación (izquierda) y temperatura (derecha) utilizadas en la interpolación.

Sobre la rejilla mostrada se consideraron distintos métodos estándar de interpolación, *Thin Plate Splines*, *Angular Distance Weighting* y *Kriging*. Tras una comparación de los métodos se concluyó que la familia de métodos que mejor se adaptaban a los problemas planteados era la de los métodos geoestadísticos de Kriging (Krige, 1951). Estos métodos han sido aplicados para variables climáticas en un gran número de estudios (Haylock et al. 2008, Biau et al, 1999, Atkinson and Lloyd, 1998, etc.) e incluyen un gran abanico de variantes para adaptar la metodología a la interpolación de variables indicador, la introducción de co-variables, el análisis de la incertidumbre, etc.

La variable precipitación es de carácter mixto, con dos sucesos asociados: la ocurrencia de precipitación y la cantidad de precipitación. Este hecho ha de ser tenido en cuenta en el proceso de interpolación y, por lo tanto, en este caso se han aplicado dos fases al proceso de interpolación: en primer lugar se interpola la variable binaria de ocurrencia y en segundo lugar se interpola la cantidad de precipitación ocurrida. La interpolación de la variable de ocurrencia se realiza con el método de Kriging de variables indicador (IK) y, para cada día, clasifica los puntos de la rejilla en puntos húmedos o con precipitación, y puntos secos. Una vez obtenida la distribución de ocurrencias, se calcula la cantidad de precipitación asociada a cada punto de grid identificado como húmedo por el IK, asignando a los puntos identificados como secos por el IK el valor 0. Esta interpolación se realiza con el método de Kriging Ordinario (OK).

Al dividir el proceso en las dos etapas anteriores se consigue no sólo ajustar la climatología de la cantidad de precipitación sino también la distribución de frecuencias de la ocurrencia de precipitación. Este hecho se muestra en la siguiente figura, que compara la frecuencia real de precipitación (izquierda, en %) con la obtenida tras el proceso de interpolación en la rejilla de 10 km (derecha).

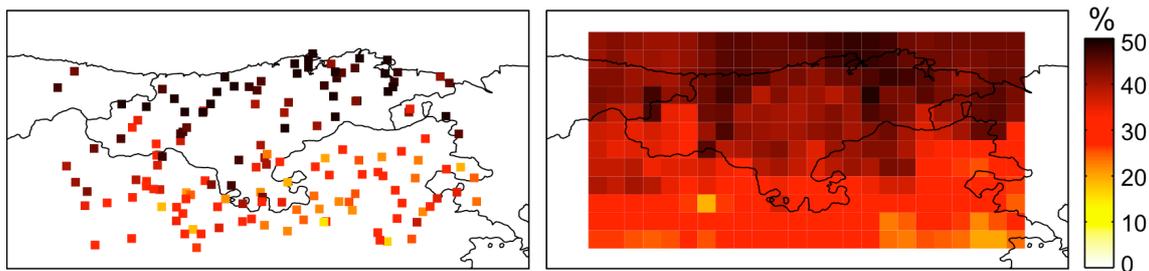


Figura 4.5: Frecuencia (%) observada (izquierda) e interpolada (derecha) de ocurrencia de precipitación.

El caso de la temperatura es más sencillo que el de la precipitación ya que no presenta la naturaleza mixta de la anterior variable y, por tanto, el proceso de interpolación se limita a la aplicación del OK a la base de datos de observaciones.

La Figura 4.6 muestra la climatología anual de la rejilla de 10 km obtenida para las tres variables.

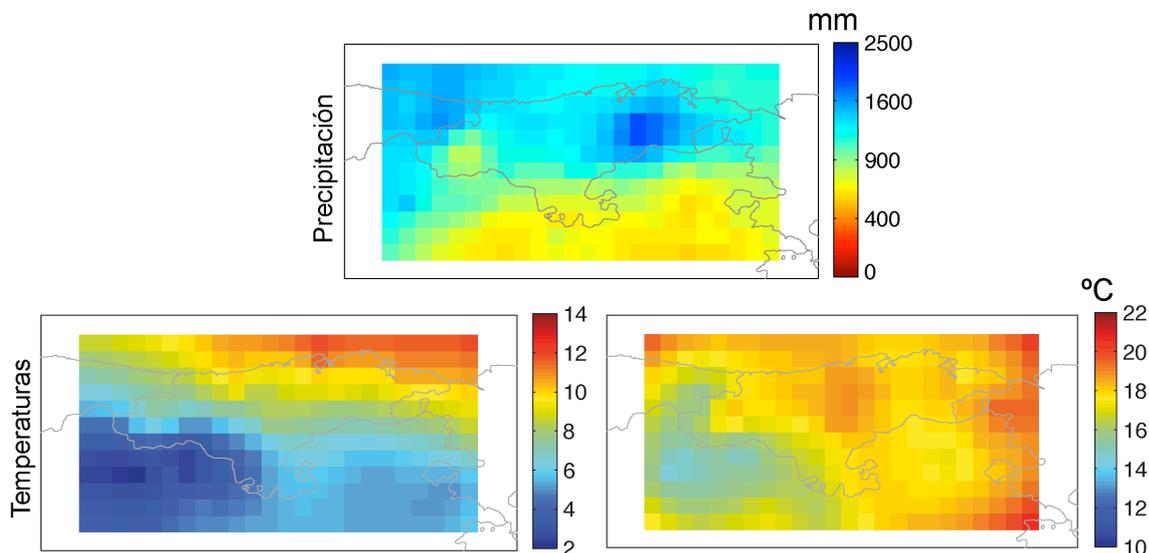


Figura 4.6: Climatología anual de las tres variables en la rejilla de 10 km: precipitación (arriba, acumulada anual), temperatura mínima (izquierda, °C) y temperatura máxima (derecha, °C).

4.2.1 Estimación de la Incertidumbre Asociada

Uno de los valores añadidos de la metodología elegida es la existencia de expresiones que cuantifican la incertidumbre del valor interpolado, dando una idea del error esperado para los distintos valores diarios de la rejilla. De este modo, para cada variable se ha construido una rejilla de incertidumbres equivalente a la de observaciones y asociada a ésta. El propio método de interpolación permite obtener directamente un valor de incertidumbre, conocido como varianza del Kriging, dependiente del modelo utilizado para aproximar la variación de la covarianza con la distancia y de los pesos asignados en la interpolación. Sin embargo, la expresión utilizada en nuestro caso incorpora la dependencia de las observaciones utilizadas en el cálculo del valor interpolado (Yamamoto, 2000). Sea X_0 un punto de grid, el término de incertidumbre asociado al valor interpolado en ese punto viene dado por la expresión:

$$S_0^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i * (Z(X_i) - Z^*(X_0))^2$$

donde, λ_i es el peso asignado en el OK a la observación $Z(X_i)$, y $Z^*(X_0)$ es el valor obtenido en el punto de grid X_0 con el OK.

La siguiente figura muestra la incertidumbre, o error, en cada punto de la rejilla de 10km asociado a la interpolación de la precipitación y las temperaturas mínima y máxima de la Figura 4.6. Esta figura muestra errores en torno a los 2mm para la precipitación y en torno a los 2°C para la temperatura mínima y máxima (nótese que los errores se promedian al considerar el dato agregado). A grandes rasgos, las zonas de mayor incertidumbre son aquellas donde la densidad de estaciones es menor, o donde hay grandes variaciones o gradientes espaciales en los datos. Por tanto, esta información es necesaria para poder utilizar los datos interpolados de forma adecuada y, así, en este proyecto se proporciona siempre la incertidumbre conjuntamente con los datos (ver, por ejemplo, las figuras de resultados finales en el Anexo de este libro).

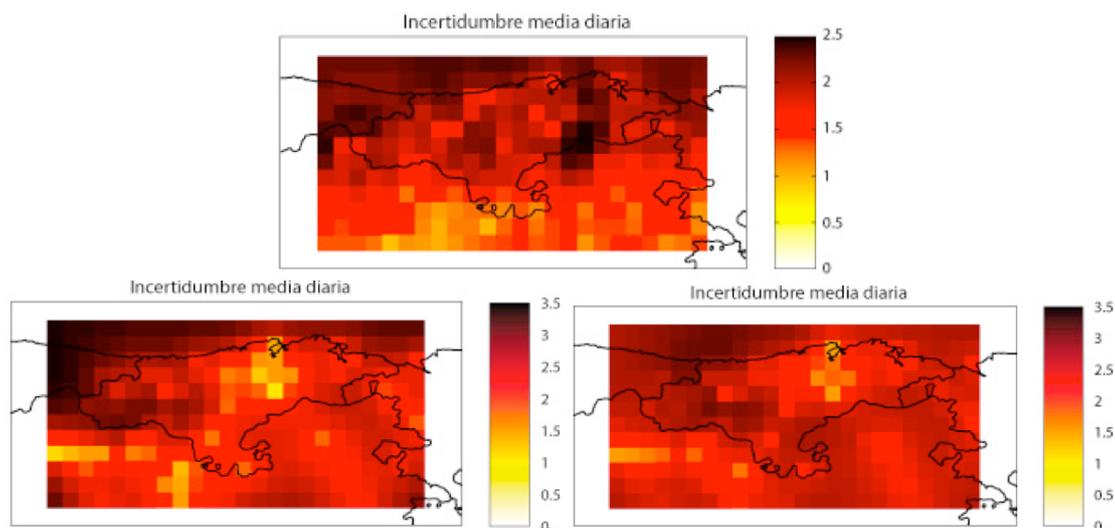


Figura 4.7: Incertidumbre (o error) diario correspondiente a las climatologías mostradas en la Figura 4.6.

4.3. Interpolación a la Rejilla de 1 km: Regresión con Covariables

Para la realización de una rejilla de alta resolución a 1km de observaciones interpoladas es necesario considerar un conjunto de variables adicionales que reflejen las características orográficas, de insolación, bloqueos orográficos, etc., en la región, de modo que contribuyan al proceso de interpolación explicando parte de la variabilidad regional de las variables consideradas. Estas variables adicionales se pueden dividir en las siguientes clases:

- *Orografía*: Se considera un modelo de regresión polinomial de grado 3.
- *Continentalidad*: Se considera la distancia de cada punto a la costa mediante un modelo de regresión de tercer grado.
- *Curvatura*: Se consideran las curvaturas longitudinal, latitudinal y global y las denominaremos por *curvCol*, *curvFil* y *curv* respectivamente.
- *Insolación*: Se consideran cinco campos de insolación para cada punto, según la declinación del Sol respecto de la Tierra. De este modo, se tienen las variables *InsolN23*, *InsolN12*, *Insol0*, *InsolP12*, *InsolP23*, correspondientes a una declinación de 23° norte (solsticio de verano), 12° norte, 0°, 12° sur y 23° sur (solsticio de invierno).
- *Bloqueos*: Se consideran las diferencias entre la altura de cada punto y la altura máxima en cada dirección (realmente en una ventana de $\pm 10^\circ$). También se incluye la distancia

al bloqueo como variable. Se considera una rosa de vientos de ocho sectores, es decir se consideran las siguientes direcciones: N, NW, W, SW, S, SE, E y NE.

Estas variables fueron calculadas para Cantabria sobre una rejilla de 1km como la mostrada para la orografía en la Figura 1.2. De este modo, se obtuvo un conjunto de 30 covariables con las que se construyó un modelo de regresión. Para ello, se procedió de forma iterativa, incorporando la variable que minimiza la raíz del error cuadrático medio (RMSE) en cada paso. El proceso de interpolación en este caso se divide en las siguientes etapas:

- En primer lugar se aproxima el valor mensual de la variable con el modelo de regresión, introduciendo en éste todas las covariables, de modo que el modelo selecciona aquellas que mejor reproducen el valor mensual observado.
- En segundo lugar se calcula el valor asociado a cada punto de la rejilla y el residuo, o error cometido por el modelo, utilizando los coeficientes obtenidos con el modelo de regresión.
- A continuación se interpola el residuo del modelo de regresión a los puntos de rejilla, corrigiendo de ese modo el valor mensual asignado por el modelo.
- Por último se interpola el valor de la anomalía diaria y se añade al valor mensual obtenido en los pasos anteriores. En el caso de la precipitación la anomalía diaria se define como el cociente entre la precipitación diaria y el valor acumulado mensual, mientras que para la temperatura la anomalía se define como la diferencia entre la media mensual y el valor diario. Estas definiciones se tienen en cuenta a la hora de añadir el valor interpolado de la anomalía diaria al valor mensual.

Al aplicar el modelo de regresión a escala mensual se realizó un análisis de los coeficientes para estudiar qué covariables de las consideradas son las que intervienen en mayor grado en la climatología mensual de la región. En la Figura 4.8, los histogramas de la fila superior muestran el número de ocurrencias de cada covariable al ajustar el modelo de regresión sobre los puntos de rejilla para cada uno de los 12x54 mapas mensuales, mientras que los histogramas inferiores muestran el número de ocurrencias de cada covariable al aplicar el modelo a la climatología mensual (12 valores). El orden de las variables es el mismo usado en su descripción.

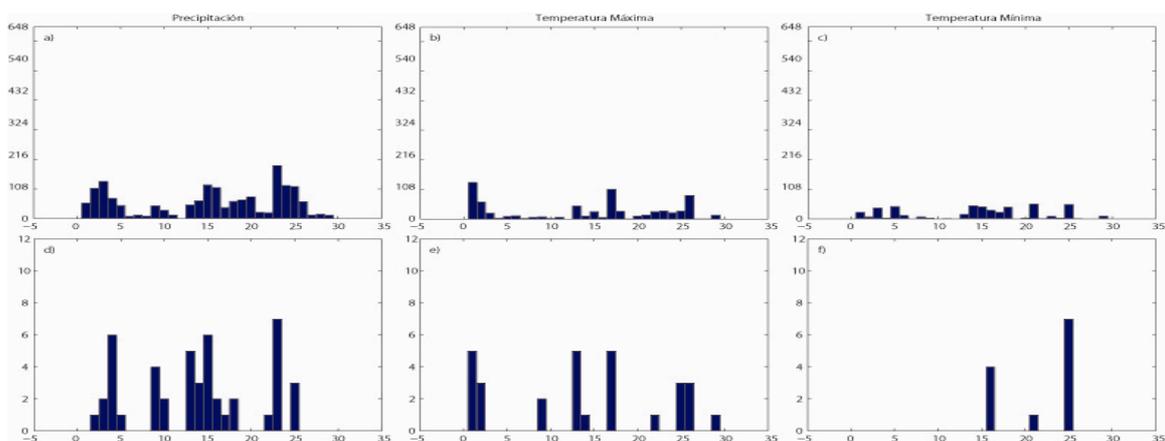


Figura 4.8: Frecuencia de aparición de las covariables en modelos de regresión ajustados con las series de datos mensuales (arriba), o con la climatología mensual (abajo).

Los histogramas mostrados en la figura anterior permiten obtener las siguientes conclusiones:

- Existen dos covariables que no intervienen en el modelo de regresión de ninguna variable: *Insolo* y *distNE*. Es decir, la insolación cuando la declinación del Sol respecto de la Tierra es de 0° y la distancia al bloqueo del Noreste.
- No existe un conjunto de covariables comunes para las tres variables que tenga una incidencia destacable en la rejilla.

- El modelo de precipitación presenta una gran incidencia de casi todas las covariables mientras que en las temperaturas los modelos son más simples y basados principalmente en la orografía, la distancia a la costa y los bloqueos.

Para mantener la coherencia entre las tres variables, se decidió utilizar un conjunto de covariables común para todas. En primer lugar, como una primera versión simplificada del método de interpolación, se consideraron únicamente la orografía y la distancia a costa para construir los modelos de regresión del dato mensual. Posteriormente, se incluyeron los bloqueos que resultaron ser significativos para alguna de las tres variables, con claro predominio del sector Noroeste: N, NW y W. Las rejillas de las tres variables fueron construidas utilizando este conjunto de covariables y los resultados obtenidos fueron revisados por el grupo de la Delegación de AEMET en Cantabria, comparando las climatologías anuales resultantes con los valores climáticos de referencia en Cantabria descritos en el Capítulo 2. Entre los problemas detectados, cabe destacar que la precipitación acumulada anual sobreestimaba los mínimos de los salientes costeros y presentaba un mínimo irreal en la zona de Comillas, cuando debía de localizarse en la costa Oriental. Como solución a este y otros problemas similares se eliminaron algunas de las estaciones incluidas inicialmente de forma automática (aplicando criterios de homogeneidad). Por otra parte, se detectaron problemas causados por la existencia de lagunas irregulares en las estaciones, que modificaban la climatología local de una zona a lo largo del tiempo, haciéndola más seca o húmeda (en función de los datos faltantes). Por tanto, en la versión final de la rejilla se rellenaron las lagunas de todas las estaciones, a escala mensual, considerando el valor climatológico dado por los datos disponibles. Este procedimiento no introduce ni elimina tendencias de la rejilla ya que las series de precipitación no presentan tendencias significativas. La Figura 4.9 muestra, la rejilla inicial construida sin rellenar previamente las lagunas y la rejilla final del proyecto obtenidas tras todas las modificaciones comentadas. Se puede observar que, por ejemplo, se recupera el mínimo de precipitación en la costa de Oriente.

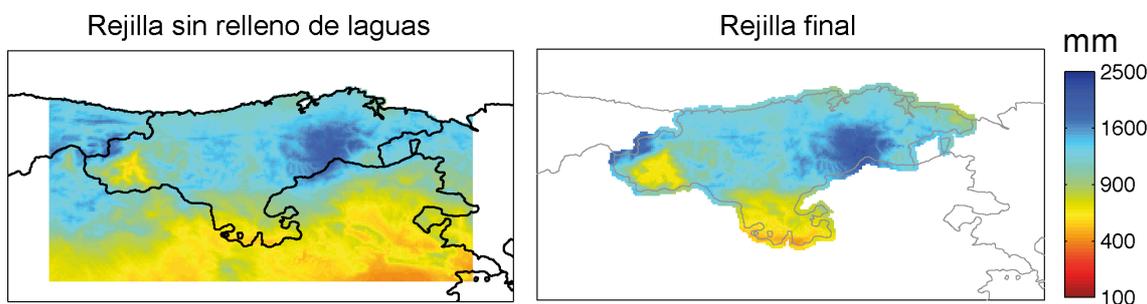


Figura 4.9. (izquierda) Climatología de la rejilla de precipitación preliminar del proyecto; (derecha) rejilla final resultante tras la validación y modificación.

Finalmente, hay zonas con baja cobertura observacional como, por ejemplo, las zonas de montaña, Liébana o el Oriente de la región, en las que la incertidumbre de la rejilla alcanza sus valores máximos. En algunas de estas regiones, como los Picos de Europa, se han instalado recientemente nuevas estaciones meteorológicas, y servirán para que, dentro de unos años, se pueda evaluar y actualizar la incertidumbre de la rejilla de alta resolución producida en este proyecto. Sin embargo, tendrán que transcurrir décadas para que estos valores puedan servir para alimentar una nueva climatología de Cantabria.

4.4. Climatologías Anuales a las Distintas Resoluciones

A modo de resumen del trabajo realizado en la elaboración de las rejillas de observaciones diarias interpoladas en Cantabria, la Figura 4.11 compara los valores anuales (medios para temperaturas y acumulados para precipitación) observados en las estaciones utilizadas, con los correspondientes a las rejillas de 10 y 1 km de resolución (la resolución de cada una de estas

rejillas se muestra en la Figura 4.10). Estos resultados, junto con la incertidumbre mostrada en la Figura 4.7, constituyen el punto de partida para el estudio de regionalización de los escenarios globales de cambio climático que se describe en las siguientes secciones y que constituyen el objetivo principal de este trabajo.

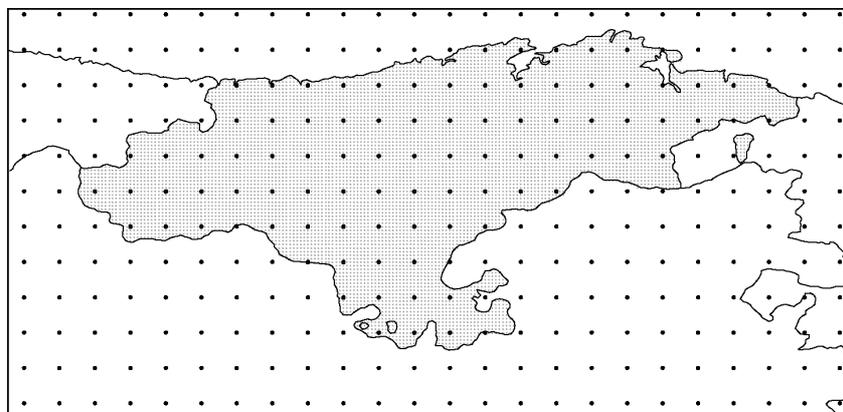


Figura 4.10. Puntos correspondientes a las rejillas de 10 km y 1 km desarrolladas en el proyecto. Obsérvese que esta última rejilla de alta resolución está limitada a Cantabria.

4.5. Climatologías Mensuales

Para poder apreciar el ciclo estacional de lluvias y temperaturas en Cantabria, las Figuras 4.12-4.17 muestran las climatologías mensuales de 10 y 1 km de resolución, así como las climatologías estacionales. En estas figuras, cada fila de corresponde a una estación del año (invierno, primavera, verano y otoño): las tres primeras columnas corresponden a los tres meses que conforman la estación, mientras que la última columna muestra el dato estacional (en este último caso, el valor mostrado en los mapas es el promedio de los valores mensuales correspondientes; es decir, en el caso de la precipitación hay que multiplicar por tres para obtener la precipitación acumulada en la estación indicada).

A partir de estas figuras se puede observar, por ejemplo, el marcado gradiente estacional de las temperaturas en la vertiente Sur, o el característico régimen pluviométrico del Norte con una clara estación seca en verano.

Figura 4.11 Mapas de valores acumulados anuales (precipitación) y medias anuales (temperatura) para las observaciones y las rejillas de 10 km y 1 km.

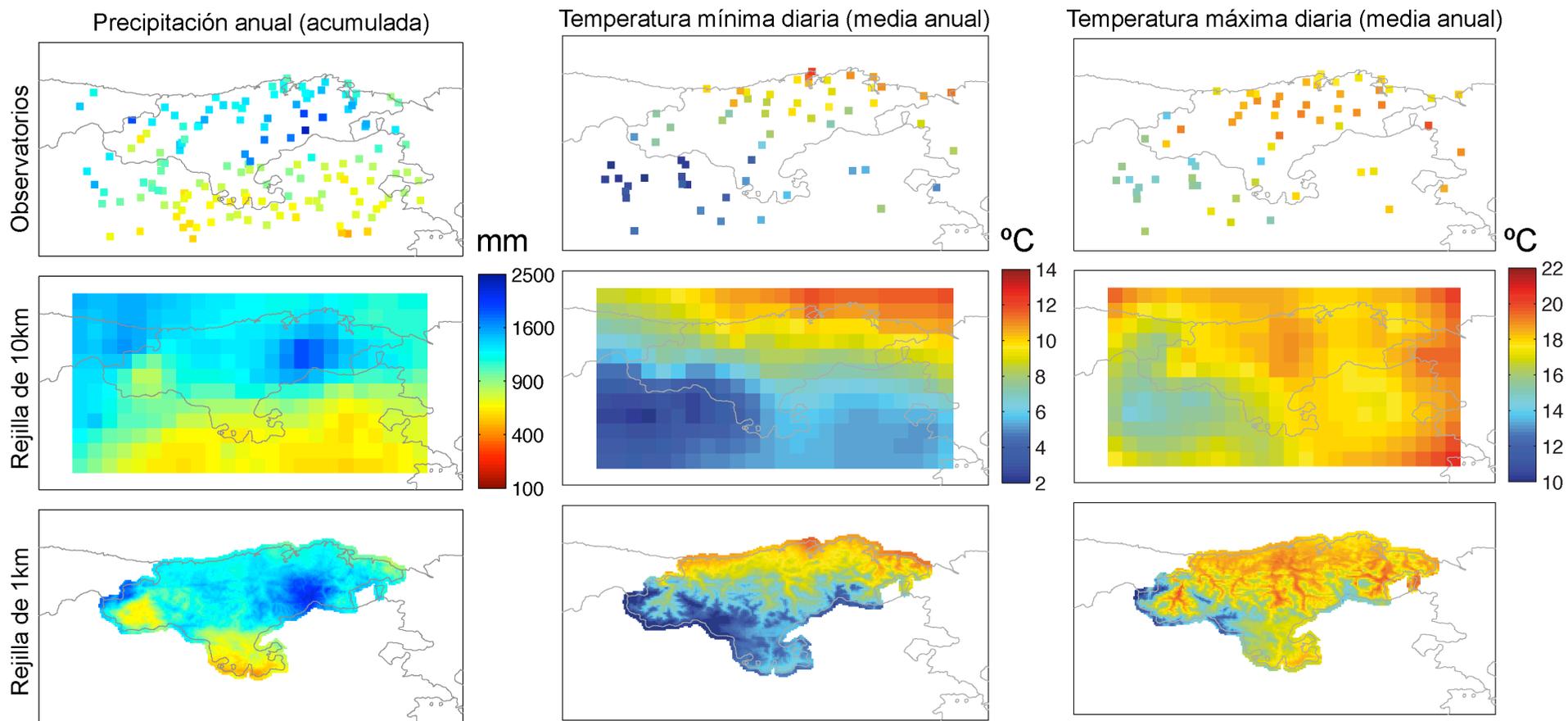


Figura 4.12. Mapas de medias mensuales/estacionales: Temperatura máxima diaria (10 km).

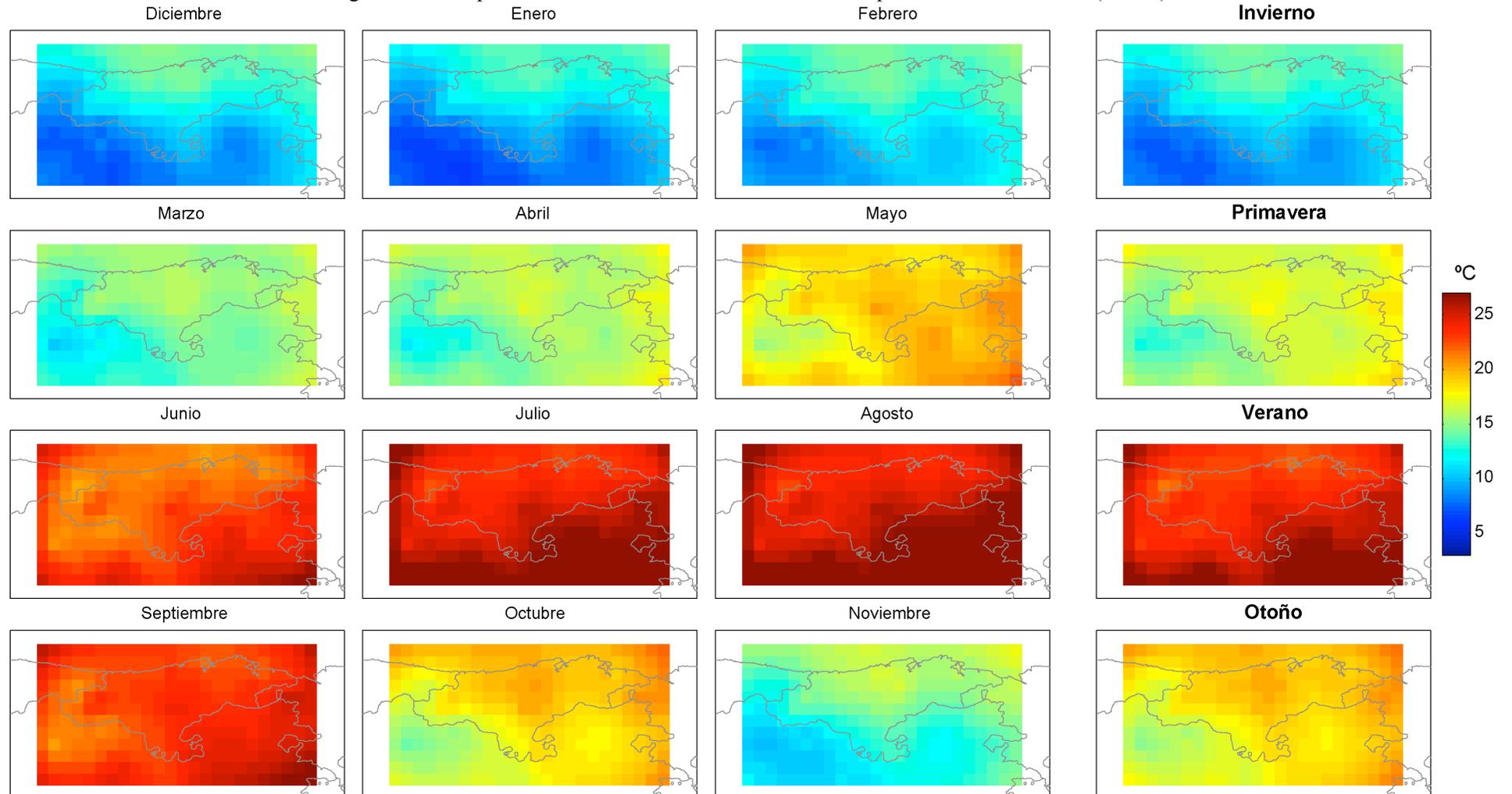


Figura 4.13. Mapas de medias mensuales/estacionales: Temperatura máxima diaria (1 km).

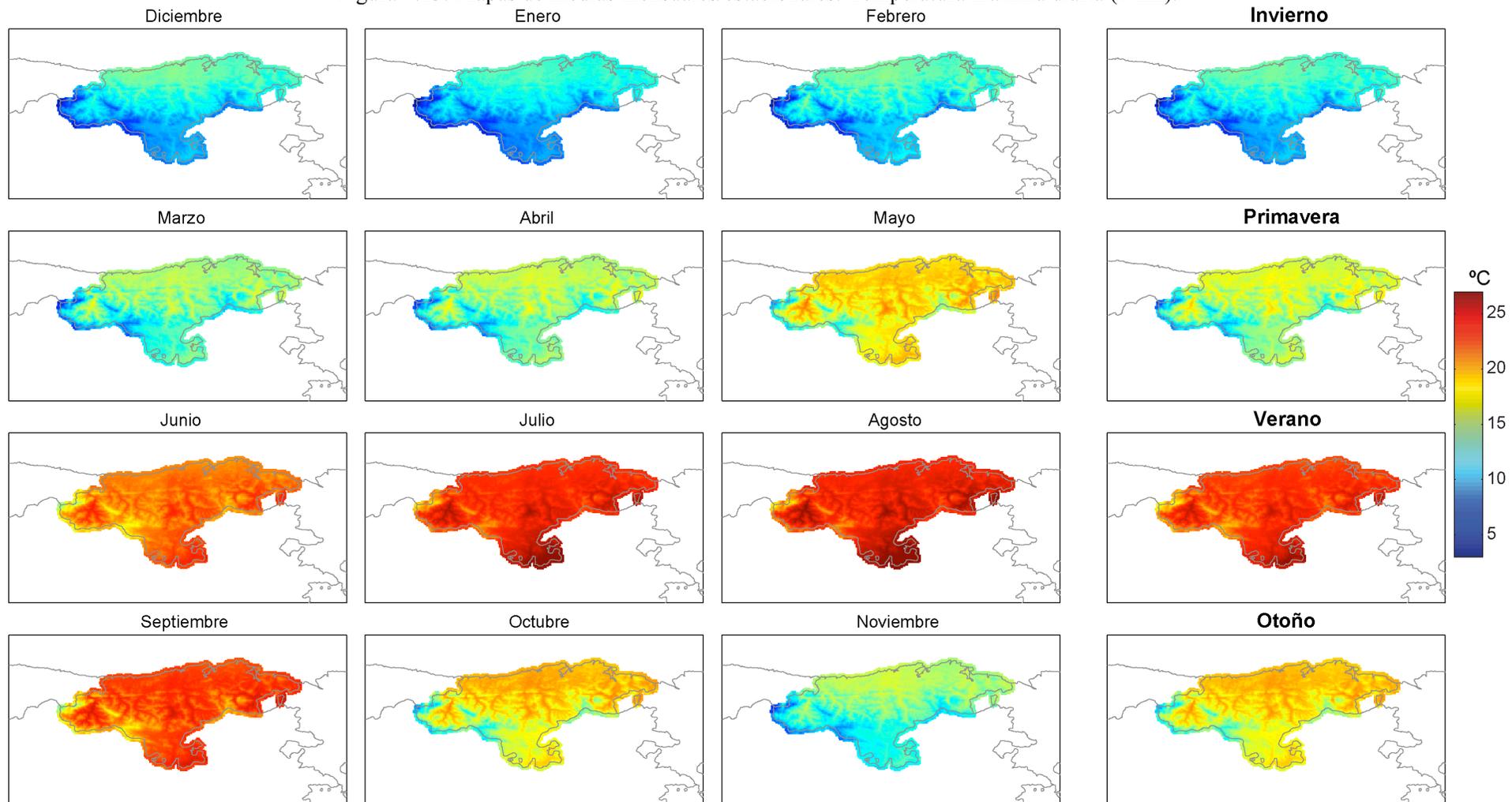


Figura 4.14. Mapas de medias mensuales/estacionales: Temperatura mínima diaria (10 km).

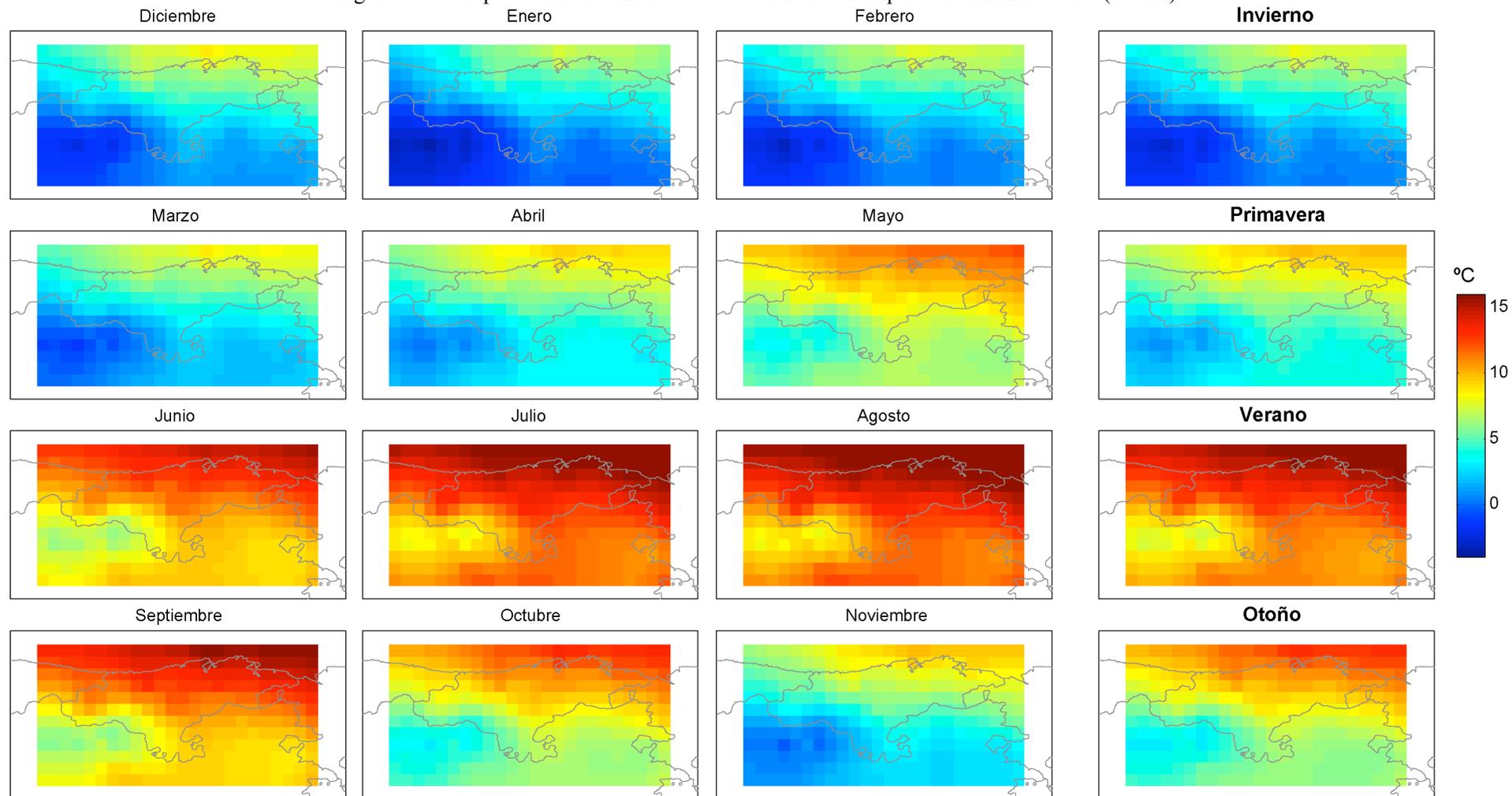


Figura 4.15. Mapas de medias mensuales/estacionales: Temperatura mínima diaria (1 km).

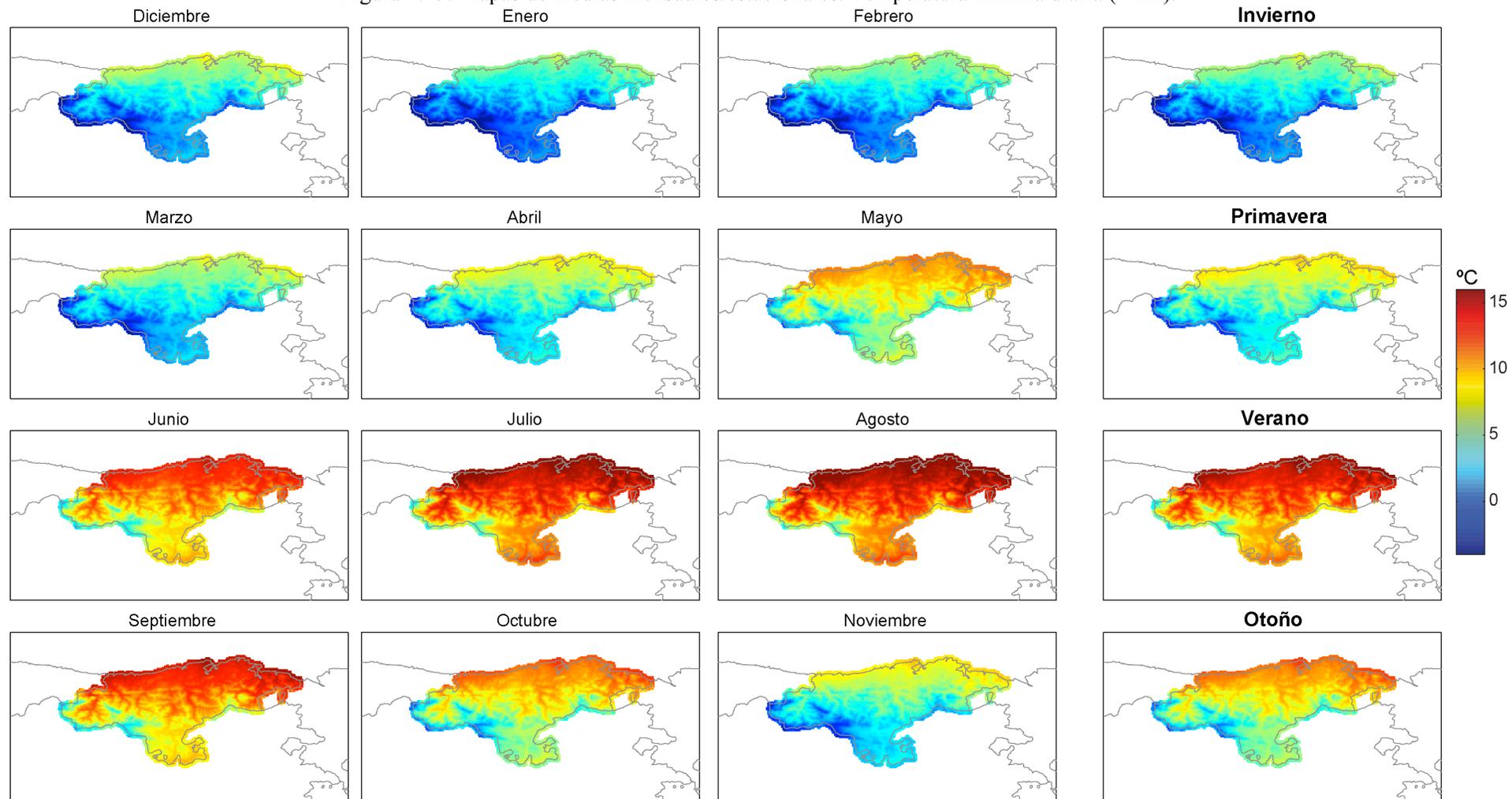


Figura 4.16. Mapas acumulados mensuales/estacionales. Precipitación (10 km).

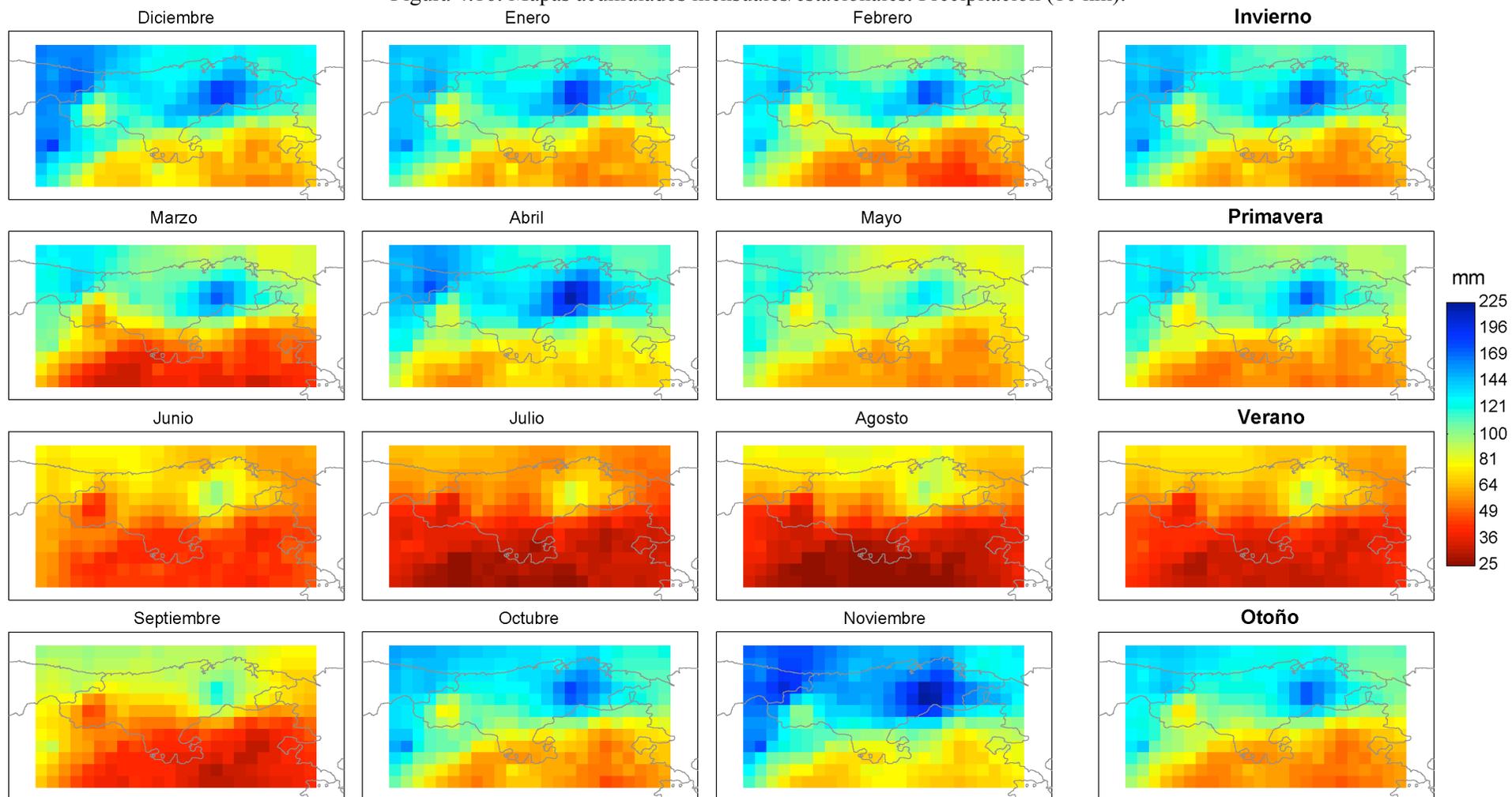
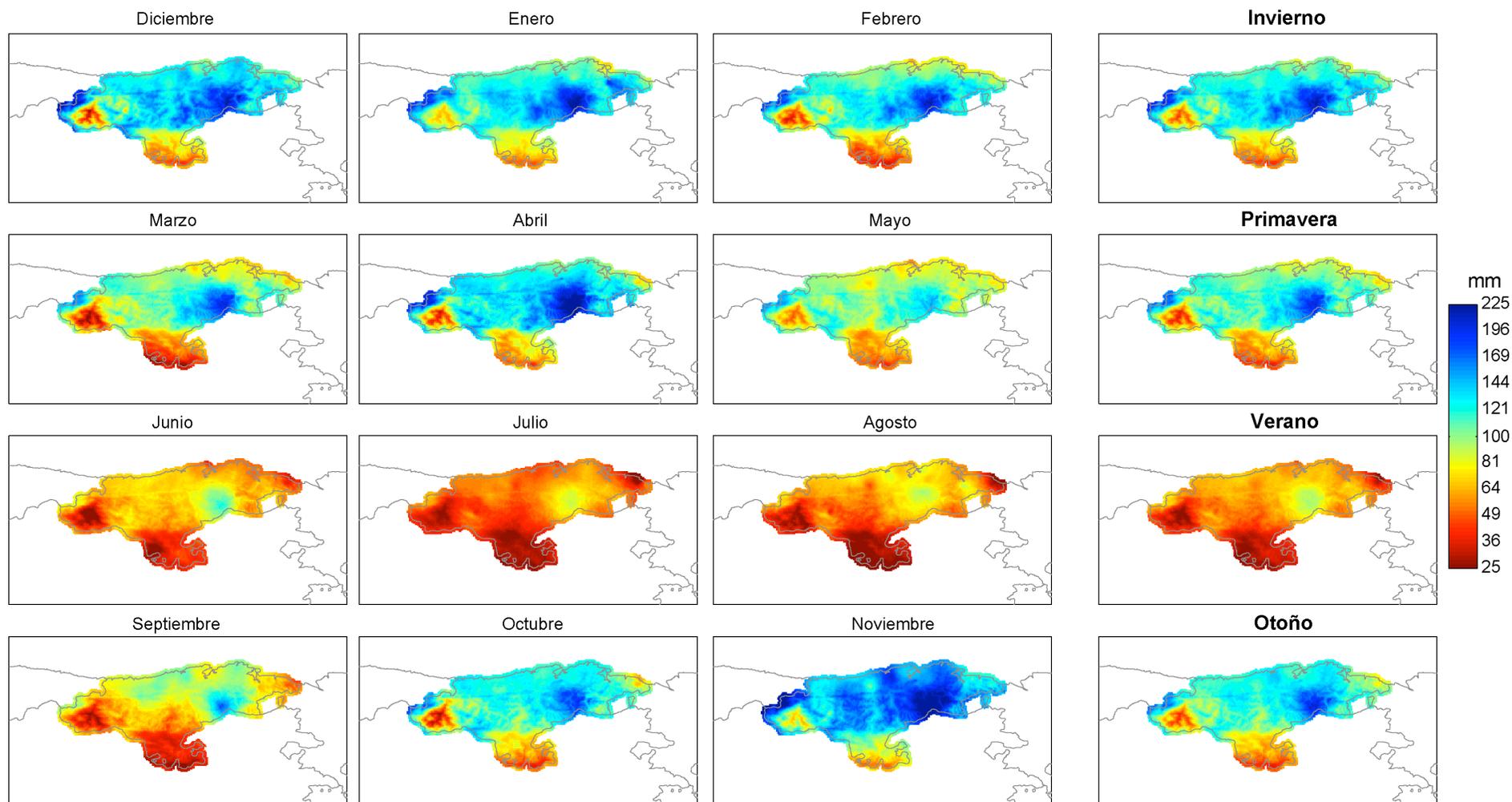


Figura 4.17. Mapas acumulados mensuales/estacionales. Precipitación (1 km).



CAPÍTULO 5

Escenarios Globales de Cambio Climático

Grupo Responsable:
Grupo de Meteorología (Dpto. de Matemática Aplicada y C.C., UC)
carmen.sordo@unican.es

5.1. Introducción

Las simulaciones globales de cambio climático (ver Sección 1.2) son la fuente principal de información para llevar a cabo la generación de escenarios regionales. La Tabla 1.1 muestra las características de 25 modelos diferentes utilizados para elaborar las conclusiones del último informe del IPCC-AR4 (la Figura 5.1 muestra las topografías sobre la zona europea de 12 de estos modelos, los marcados en negrita en la tabla, ilustrando sus limitaciones para reproducir la climatología regional de la Península Ibérica). A partir de estos modelos el IPCC-AR4 elaboró los escenarios globales de cambio climático que se muestran en la Figura 1.1 y que indican un claro calentamiento sobre toda Europa y una probable disminución de la precipitación en el área de influencia Mediterránea.

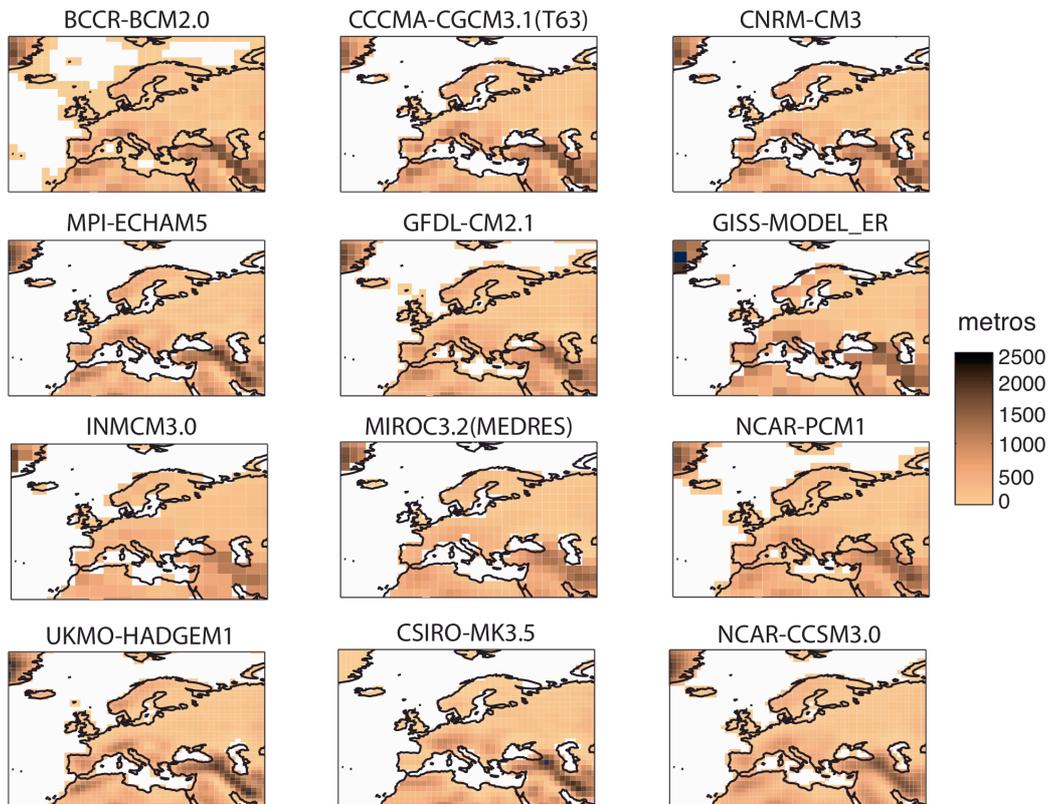


Figura 5.1. Topografías en la región europea de doce de los modelos globales del IPCC-AR4 (ver Tabla 1.1) mostradas en la rejilla propia de cada modelo.

5.2. Análisis Global en el Mediterráneo Occidental

Para realizar un primer análisis sobre el comportamiento de estos modelos en el Mediterráneo occidental (zona de previsible disminución de precipitación, según el IPCC-AR4), se accedió⁴ a los datos mensuales de temperatura y precipitación para esos 12 modelos considerando tanto el período de control 20c3m (1960-2000), como tres escenarios distintos (*B1*, *A2* y *A1B*) del siglo XXI. Las Figuras 5.2 y 5.3 muestran los resultados de cada uno de los modelos para la temperatura media y precipitación, respectivamente, en la resolución propia de cada modelo. Estas figuras muestran, como era de esperar, que el clima simulado por estos modelos representa solamente las características globales, pudiendo discriminar únicamente un gradiente Norte-Sur para temperaturas y precipitación en la Península Ibérica, con valores muy suavizados respecto de las observaciones.

Las dos últimas filas de estas figuras representan el valor medio de todos los modelos (es decir, la señal del multi-modelo) y la desviación estándar de los mismos (es decir, la incertidumbre), respectivamente. Así, para el clima presente (1961-2000, mostrado en la primera columna), los valores de temperatura media en la Península Ibérica se encuentran entre los 10° y los 18°C del Norte y el Sur, respectivamente, con una variabilidad media de 1°C; en el caso de la precipitación, los valores en la Península Ibérica varían entre los 1200mm del Noroeste y los 300mm del Sureste, con variaciones entre 300 y 100mm, respectivamente. Estos valores indican la capacidad de los modelos globales del clima para representar la climatología observada en las últimas décadas en un período de control (1961-2000 en este caso) y, así, permiten cuantificar y validar su calidad en una determinada región. Por otra parte, cuando se analizan las proyecciones de un período futuro (mostradas en las columnas 2-4), como diferencia respecto del período de control), la media y la desviación de dichas diferencias proporcionan directamente el valor de la señal incremento/decremento y su incertidumbre esperada. Por tanto, en aquellas regiones donde el valor de la incertidumbre sea cercano al de la propia señal, los modelos globales no estarán proporcionando una señal coherente, por lo que no existirá una señal clara de variación en el futuro.

Estas figuras muestran que en la zona Norte de la península Ibérica hay un gran consenso entre los modelos en cuanto al incremento de temperatura, siendo la incertidumbre mucho menor que la señal de calentamiento especialmente para la segunda mitad de siglo. Sin embargo, en el caso de la precipitación, el decremento de hasta 200 mm de precipitación que dan algunos modelos en el peor de los escenarios tiene un grado de incertidumbre mayor, ya que la dispersión es más elevada, llegando a ser mayor que la propia amplitud de la señal. Por tanto, aunque hay una señal de disminución de precipitación, es necesario un estudio más detallado a nivel regional de estos modelos (proyectándolos con técnicas de regionalización) para poder tener en cuenta la climatología regional de Cantabria y poder evaluar de nuevo la señal y la incertidumbre, una vez calibradas o regionalizadas.

Por último, obsérvese que en el caso de precipitación, aunque existe coherencia en la disminución progresiva de las precipitaciones en la región Mediterránea (incluyendo la Península Ibérica), los modelos presentan grandes incoherencias en el centro y norte de Europa, con valores opuestos en la señal prevista. En estos casos la incertidumbre es mayor que la propia señal por lo que no tendría sentido regionalizar las simulaciones en estas regiones, sino seguir perfeccionando la física de los modelos globales para que, además de simular de forma coherente el clima observado, proyecten de forma coherente los forzamientos futuros previstos en los distintos escenarios.

⁴ Los datos mensuales se descargaron del Earth System Grid (<https://esg.llnl.gov:8443/index.jsp>), repositorio del PCMDI.

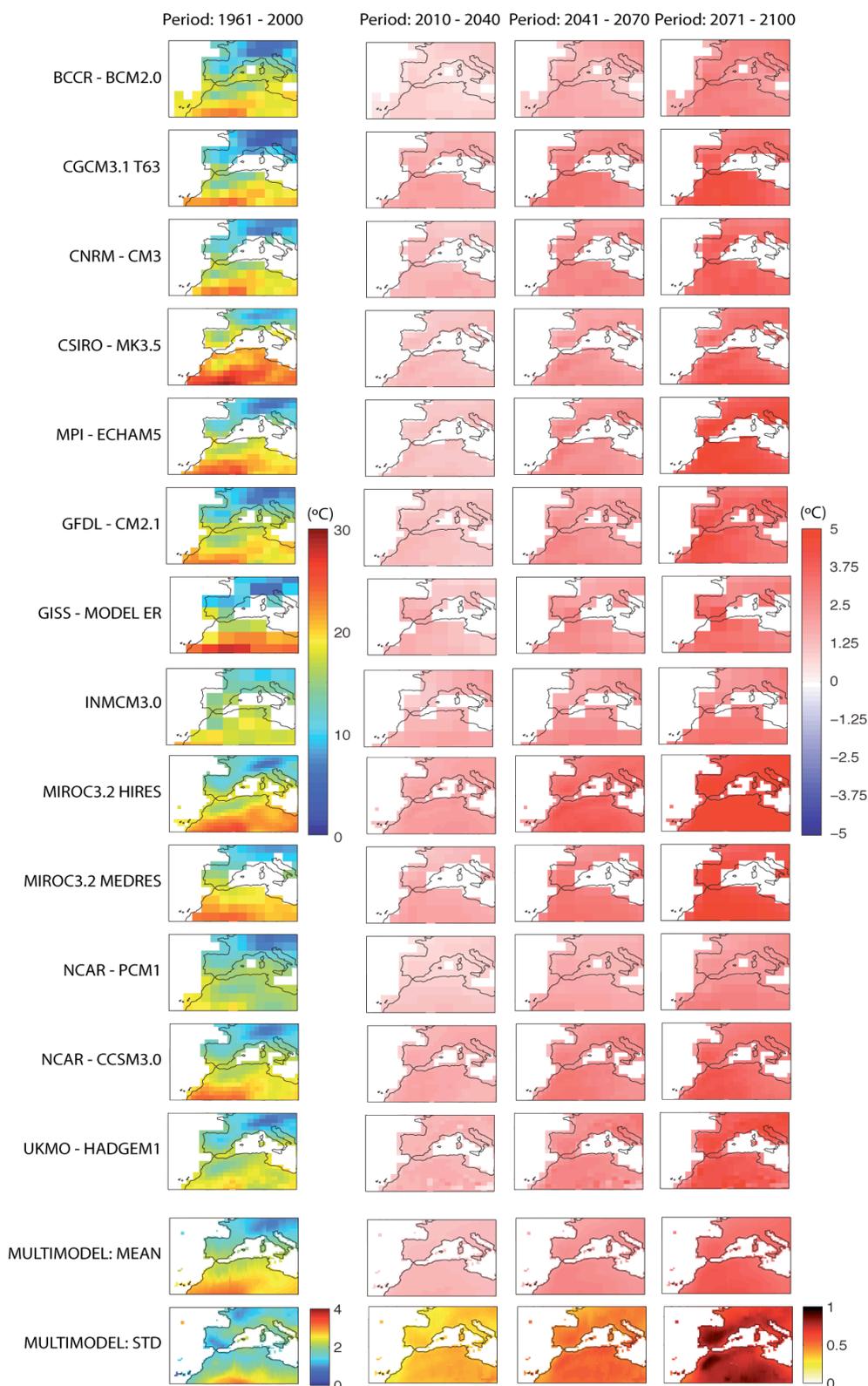


Figura 5.2: Temperatura media anual simulada por los modelos globales del IPCC-AR4 (Tabla 1.1) para el período 1960-2000 (primera columna) e incrementos para tres períodos futuros distintos (2010-2040, 2041-2070 y 2071-2100) para el escenario A1B. Las dos últimas filas muestran el promedio y la incertidumbre (desviación estándar) del conjunto multi-modelo de predicciones, respectivamente.

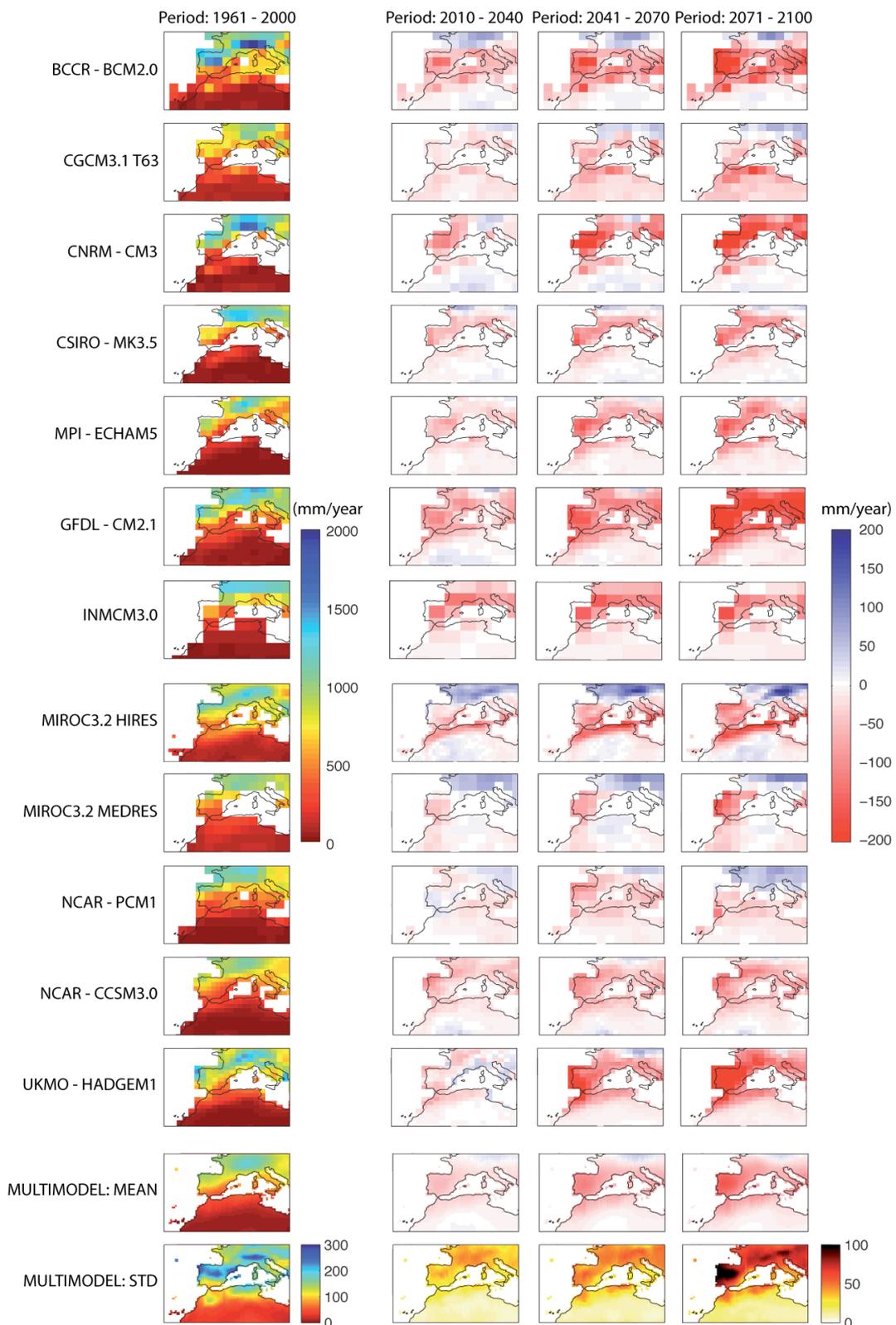


Figura 5.3: Precipitación anual acumulada simulada por los modelos globales del IPCC-AR4 (Tabla 1.1) para el período 1960-2000 (primera columna) e incrementos para tres períodos futuros distintos (2010-2040, 2041-2070 y 2071-2100) para el escenario A1B. Las dos últimas filas muestran el promedio y la incertidumbre (desviación estándar) del conjunto multi-modelo de predicciones, respectivamente.

5.3. Proyecciones Globales para Cantabria

En esta sección se muestran los escenarios obtenidos para Cantabria a partir del conjunto de modelos globales analizado en la sección anterior; para ello se ha interpolado la salida de cada modelo a un único punto en el centro de la región (nótese que incluso los modelos globales de mayor resolución tratan a Cantabria como un único punto de rejilla). La Figura 5.4 resume la información probabilística del *ensemble* multi-modelo mediante una serie temporal que muestra la evolución, año a año, del valor medio medio y la dispersión (dada por los valores mínimo y máximo, en este caso) de la temperatura y precipitación del *ensemble*, para los dos escenarios B1 y A2 (los resultados del escenario A1B tendrían valores intermedios). Como se puede ver en estas figuras, el incremento de temperatura proyectado para final de siglo oscila entre los 2 y los 4 grados (según el escenario) con una dispersión entorno a los 2 grados (según el modelo). En el caso de la precipitación, la reducción oscila entre los 50 y los 200 mm (según el escenario), con una dispersión de 200 mm (según el modelo).

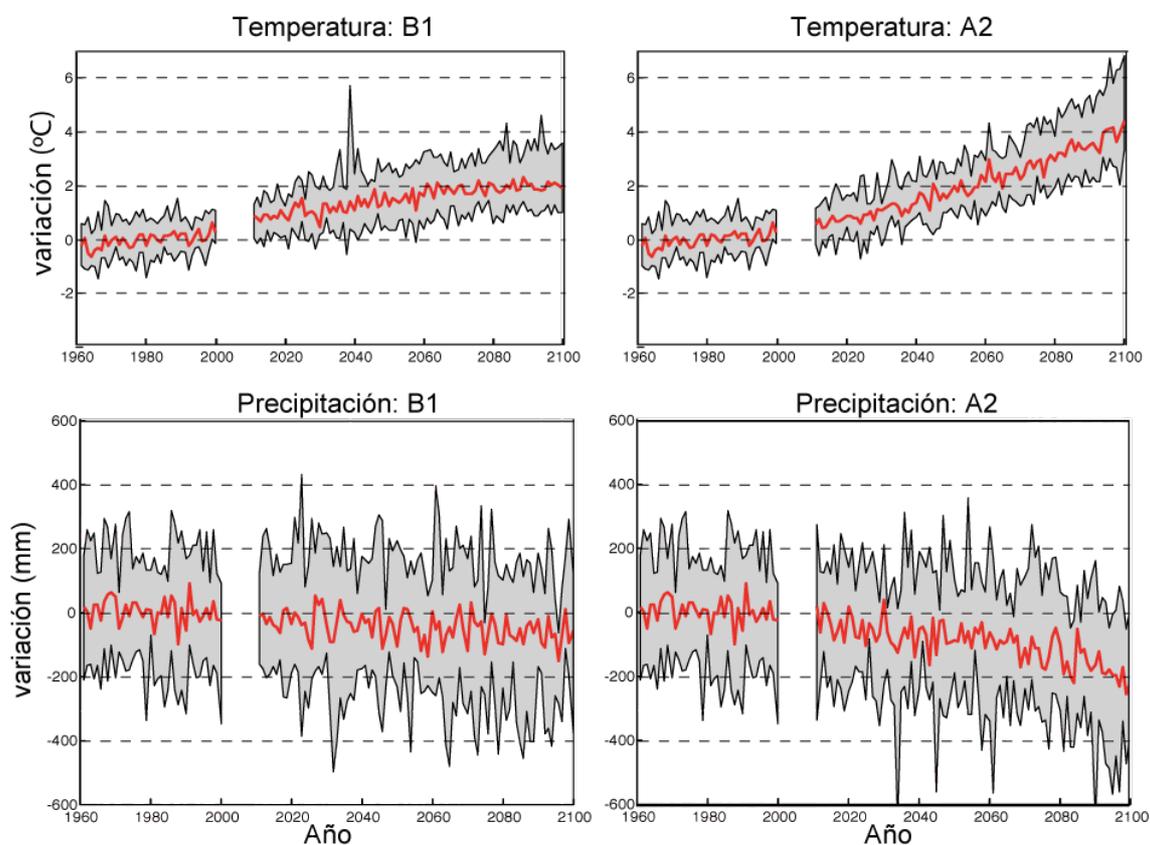


Figura 5.4: Incrementos medios y variabilidad de la temperatura y precipitación para Cantabria dados por los 12 modelos⁵ del IPCC-AR4 mostrados en las Figuras 5.2 y 5.3; la variabilidad (área sombreada) se ha calculado como el mínimo/máximo de los valores del conjunto. Nótese que estas series temporales sirven únicamente para mostrar la variabilidad interanual y las tendencias de los datos y no tienen valor año a año, sino que han de analizarse en un período climático válido (interdecadal).

Dada la coherencia del multi-modelo observada en ambos casos, se procedió a aplicar técnicas de regionalización a los mismos para incorporar en el análisis las diferencias climáticas existentes en la región. En los siguientes capítulos se muestran los resultados obtenidos al regionalizar estos escenarios globales con técnicas estadísticas y dinámicas.

⁵ Observar que, en el caso de la precipitación el número total de modelos es 11, al no ser accesible la información de uno de ellos.

CAPÍTULO 6

Regionalización Dinámica: Modelos Regionales del Clima

Grupo Responsable:
Grupo de Meteorología (Dpto. de Matemática Aplicada y C.C., UC)
jesus.fdez@unican.es

6.1. Introducción

Los modelos regionales del clima (RCM, según sus siglas en inglés) se utilizan para mejorar la resolución de las predicciones climáticas globales sobre una región de interés. Para ello, el modelo regional se anida a las salidas de los modelos globales de clima, que actúan como condiciones de frontera, y se resuelven a mayor resolución (25-50 km), representando de forma más adecuada la variabilidad regional del clima. Para tener en cuenta este nuevo elemento en la cascada de incertidumbres de la proyección de escenarios de cambio climático, es necesario considerar un conjunto de modelos regionales acoplados de manera apropiada a un conjunto de modelos globales. Así, no sólo se pueden obtener las proyecciones regionales sino también una medida de su incertidumbre (tanto global como regional) que, como ya se ha mencionado en varias ocasiones, es de vital importancia a la hora de analizar los impactos derivados.

La generación de un conjunto (*ensemble*) de simulaciones de RCMs es una ingente tarea que no puede ser llevada a cabo de forma aislada por un grupo de investigación, sino que requiere una acción conjunta a nivel internacional. Para dar cuenta de la magnitud de los recursos necesarios en el desarrollo de esta tarea, en el proyecto Europeo PRUDENCE, del 5º Programa Marco de la UE, se utilizaron una serie de modelos regionales europeos para simular la variabilidad regional del cambio climático, anidando todos los modelos en un único modelo global. En el proyecto ENSEMBLES, del 6º Programa Marco, se generalizó este estudio para considerar el efecto de los distintos modelos globales, que actúan como forzamiento del modelo regional. Para ello, se consideró un experimento definido por la matriz de acoplamiento que se muestra en la Tabla 6.1 en la que se indican los modelos regionales en las filas y los globales en las columnas. En este experimento se ha considerado un único escenario de cambio climático (A1B) y un horizonte de simulación hasta 2050 (aunque algunos modelos han extendido el horizonte hasta 2100). En el presente estudio se ha hecho uso de esta información, disponible de forma pública desde principios de 2009, y se han evaluado los resultados en el Norte Peninsular y, más concretamente, en Cantabria. Para ello, los datos de los distintos modelos regionales han sido descargados e interpolados bilinealmente a una rejilla regular común de 0.25°. En particular, se han considerado las simulaciones regionales descritas en la Tabla 6.2.

Adicionalmente, para determinar la posible mejora introducida por un aumento de resolución, se ha realizado una simulación con el modelo WRF, aumentando la resolución respecto a los RCM de ENSEMBLES. Tratándose de un único modelo, no hay posibilidad de evaluar incertidumbres, excepto las debidas al uso de distintas parametrizaciones (Fernández et al., 2007), por lo que se ha preferido utilizar en este trabajo la aproximación multimodelo de ENSEMBLES. Los resultados a alta resolución obtenidos con WRF se presentan en el último apartado de esta sección.

Global => RCM	METO-HC	MPIMET	IPSL	CNRM	NERSC	Total (1950-2050)
METO-HC	1950-2100	1950-2100				2
MPIMET		1950-2100	1950-2050			2
CNRM				1950-2050		1
DMI		1950-2050		1950-2100		2
ETHZ	1950-2050					1
KNMI		1950-2100				1
ICTP		1950-2100				1
SMHI	1950-2050	1950-2050			1950-2100	3
UCLM	1950-2050					1
Met.No					1950-2050	1
Total (1950-2050)	4	6	2	3	2	17

Tabla 6.1: Matriz de RCMs del proyecto ENSEMBLES. Se indican los centros productores de las simulaciones, tanto globales (columnas) como regionales (filas). METO-HC (MetOffice-Hadley Center, Reino Unido), MPIMET (Instituto Max Plank de Meteorología, Alemania), IPSL (Instituto Pierre Simon Laplace, Francia), CNRM (Centro Nacional para la Investigación Meteorológica, Francia), NERSC (Nansen Environmental and Remote Sensing Center, Noruega), DMI (Instituto Meteorológico Danés, Dinamarca), ETHZ (Instituto Federal de Tecnología en Zurich, Suiza), KNMI (Instituto Meteorológico Holandés, Holanda), ICTP (Centro Internacional de Física Teórica, Italia), SMHI (Instituto Meteorológico Sueco, Suecia), UCLM (Universidad de Castilla-La Mancha, España), METNO (Instituto Meteorológico Noruego, Noruega).

CENTRO	MODELO	MODELO GLOBAL	PERIODO ERA40	PERIODO A1B
Danish Meteorological Institute - DMI	HIRHAM5	ARPEGEv4.5 SG (CNRM)	1958-2002	1951-1990
The Royal Netherlands Meteorological Institute - KNMI	RACMO2	ECHAM5r3 (MPIMET)	1958-2002	1950-2100
Swedish Meteorological and Hydrological Institute - SMHI	RCA 50km	ECHAM5r3 (MPIMET)	1961-2000	1961-2100
Hadley Center for Climate Prediction and Research - HC	HadRM3Q0	HadCM3Q0	1959-2002	1951-2100
Météo-France - CNRM	AladdinCNRM-RM4.5	ARPEGEv4.5 SG (CNRM)	1958-2001	1950-2050
Max-Planck Institute for Meteorology - MPI	REMO 5.7	ECHAM5r3 (MPIMET)	1961-2000	1951-2100
Swiss Institute of Technology - ETHZ	CLM	HadCM3Q0	1961-2000	1951-2050
The Norwegian Meteorological Institute - METNO	HIRHAM	BCM (METNO)	1961-2000	1951-2050
Universidad de Castilla La Mancha - UCLM	PROMES	HadCM3e1	1961-2000	1951-2050

Tabla 6.2: Modelos regionales de ENSEMBLES utilizados en el estudio. Para cada uno se indica el centro productor, el modelo utilizado, el modelo global al que se anida la simulación y los periodos simulados, tanto anidados a ERA40 como al modelo global indicado. Todos estos modelos proporcionan valores diarios de precipitación y temperaturas máxima y mínima.

6.2. Climatologías de los Modelos Regionales

Con objeto de analizar la variabilidad y la coherencia del conjunto de modelos regionales en el Norte de la Península Ibérica, se ha realizado un estudio comparativo de las temperaturas mínima y máxima y la precipitación, así como de las tendencias resultantes. Las Figuras 6.1 y 6.2 muestran una comparación de la temperatura mínima y máxima anual, respectivamente, correspondiente a los distintos modelos regionales en el periodo 1961-2000, obtenidas a partir de las simulaciones anidadas en condiciones de contorno perfectas (ERA40). En la primera columna se muestra la temperatura dada por los distintos modelos regionales en la rejilla común de 25 km; en la segunda columna se muestran las tendencias detectadas en cada punto de rejilla utilizando el test de Mann-Kendall (las tendencias se muestran en grados por año).

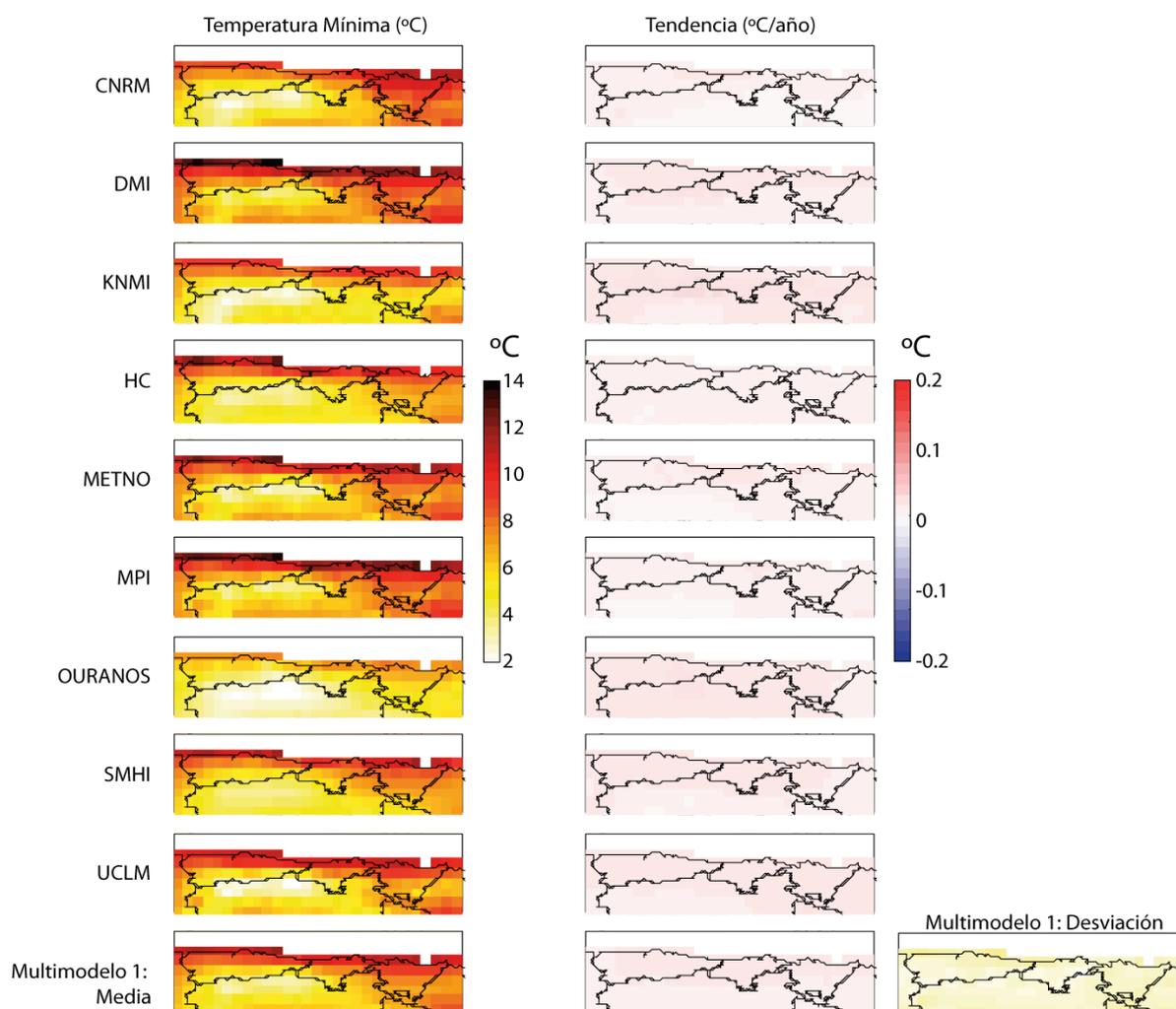


Figura 6.1: Temperatura mínima (°C) promediada en el periodo 1961-2000. Las filas corresponden a los diferentes RCMs (°C) y la tendencia (°C/año).

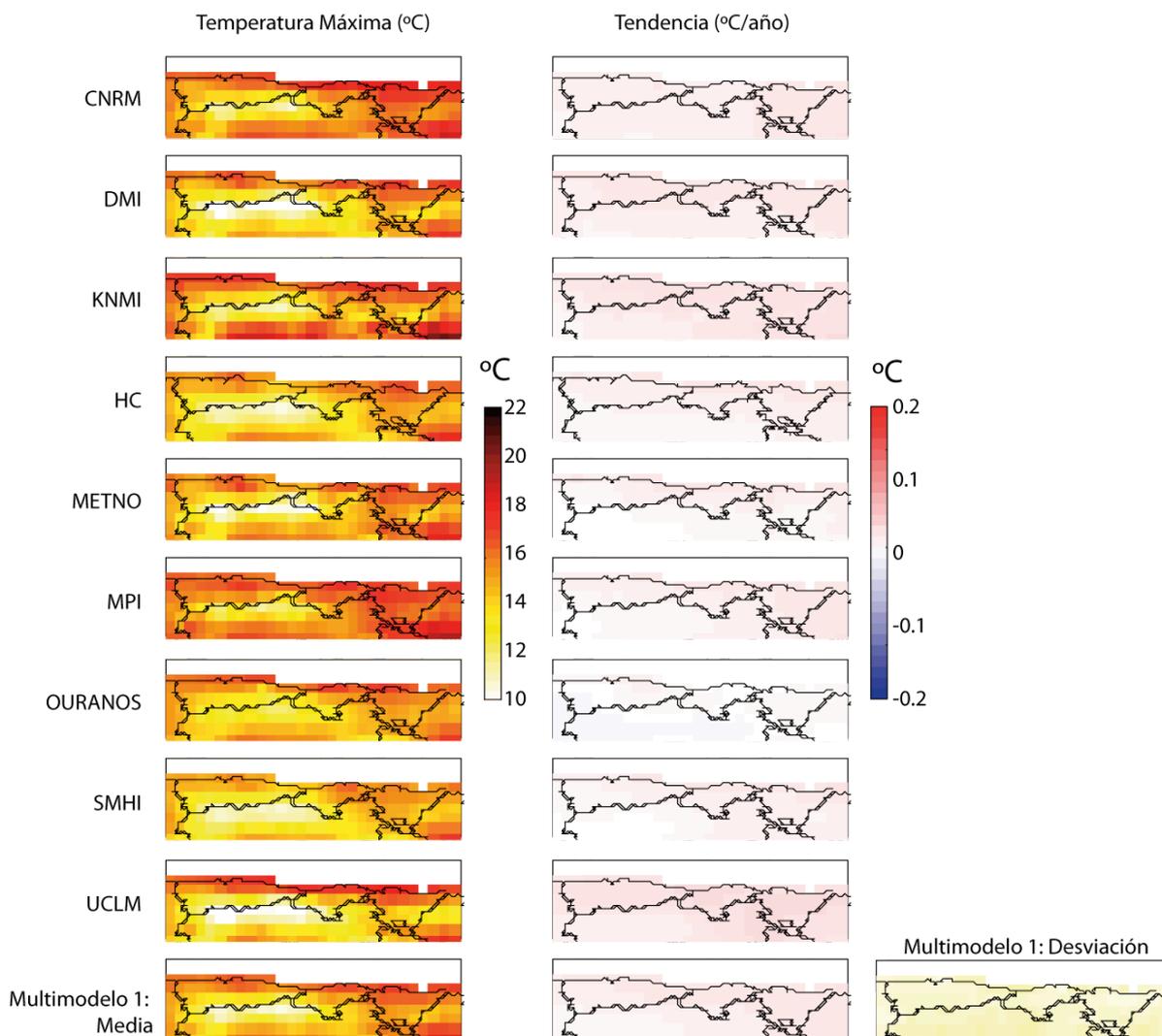


Figura 6.2: Como la Figura 6.1, pero para la temperatura máxima.

Estas figuras muestran que los distintos modelos regionales representan adecuadamente el gradiente Norte-Sur (Atlántico-continental) de las temperaturas en la Costa Norte de la Península Ibérica (en particular de Cantabria), así como su magnitud (ver, por ejemplo, las rejillas de observaciones interpoladas del Capítulo 4). Además, los modelos presentan un incremento coherente de las temperaturas mínimas y máximas. Por tanto, puede considerarse que el multi-modelo representa adecuadamente las temperaturas mínima y máxima de esta zona.

La Figura 6.3 muestra la precipitación acumulada anual promedio del periodo 1961-2000, obtenidas a partir de las simulaciones anidadas en condiciones de contorno perfectas (ERA40). En este caso, existe una gran variabilidad entre los distintos modelos (de hecho alguno de ellos es muy deficiente y debería ser descartado para analizar la variabilidad del clima en Cantabria, aunque esto no quiere decir que el modelo sea deficiente en otras regiones). Para descartar aquellos modelos deficientes en cuanto a la representación de la precipitación se utilizaron los resultados de un estudio más amplio, sobre toda la Península Ibérica, en el que se analiza la capacidad de los modelos para representar los distintos regímenes de precipitaciones (ver Herrera et al. 2009). En ese estudio se concluyó que un subconjunto de modelos: KNMI, HC, MPI, ETHZ y UCLM, reproducían de forma más adecuada la precipitación. Por tanto, en este informe se presentan tanto los resultados del multimodelo formado por todos los RCMs

(Multimodelo 1) como del multimodelo reducido formado sólo por los mejores modelos (Multimodelo 2). La Figura 6.3 muestra que el segundo multimodelo reproduce de forma más coherente la precipitación, con una menor dispersión.

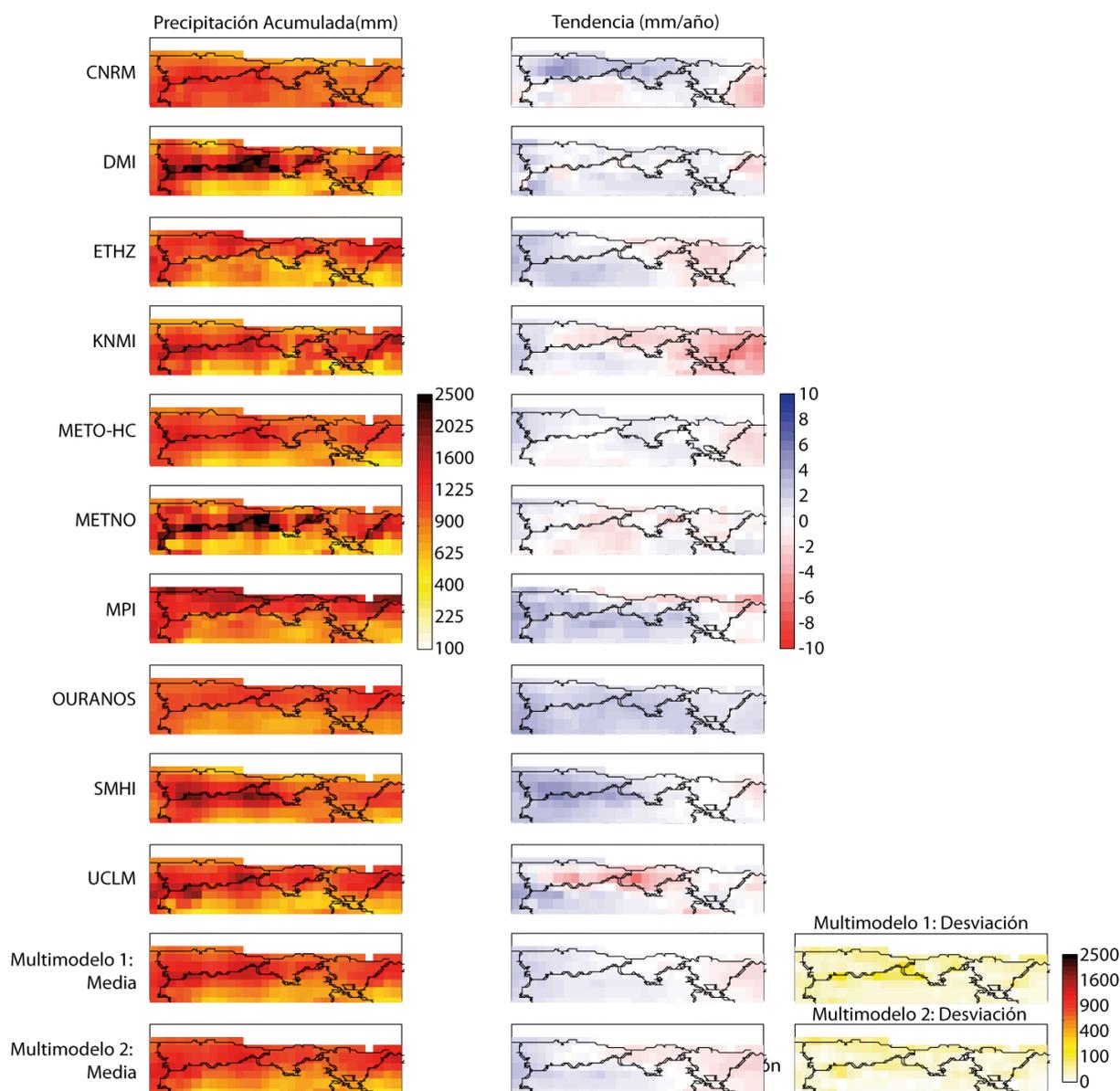


Figura 6.3: Precipitación acumulada anual (mm) promediada en el periodo 1961-2000 y la tendencia (mm/año). Las filas corresponden a los diferentes RCMs.

La Figura 6.4 muestra la media del ensemble interpolado a la rejilla de 10 km en Cantabria para poder compararlo con las observaciones, aunque el campo se muestre suavizado; se puede observar que el multi-modelo presenta un patrón espacial similar al observado, aunque con una menor intensidad. También se muestra la dispersión de los modelos, es decir, su variabilidad; se puede observar que las mayores diferencias en la precipitación se producen en las zonas montañosas, sobre todo en la zona de los Picos de Europa, donde los forzamientos orográficos añaden un grado adicional de complejidad a la modelización regional del clima. Sin embargo, eliminado los modelos más deficientes esta variabilidad se reduce significativamente (no se muestra).

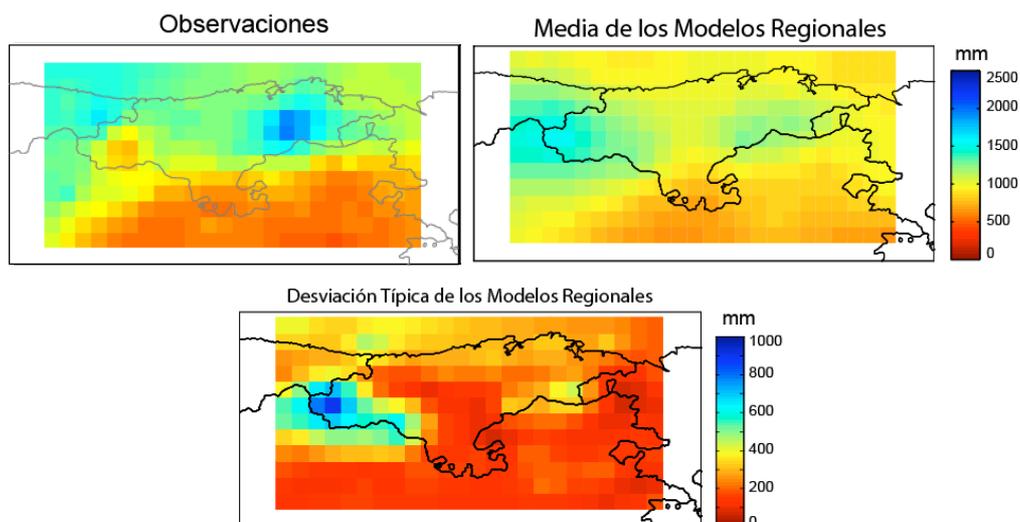


Figura 6.4: Precipitación acumulada anual dada por la rejilla Cantabria 10km, junto con la promediada en todos los modelos regionales de ENSEMBLES y la desviación típica de los promedios de cada modelo.

6.3. Proyecciones Regionales para Cantabria

Una vez seleccionado un conjunto de modelos regionales que sea capaz de reproducir la climatología observada de las últimas décadas (por ejemplo, los RCMs del multi-modelo2 de la sección anterior), se pueden utilizar las simulaciones de estos modelos anidadas en las proyecciones globales del clima para regionalizar los escenarios de cambio climático. Con el fin de analizar el carácter regional de los resultados obtenidos, se consideran cuatro grandes zonas climáticas de la región: zona litoral, valle del Pas, valle de Liébana y Ebro, mostradas en la Fig. 6.5 con distintos "cuadrados" que hacen referencia a la resolución de los datos utilizados.

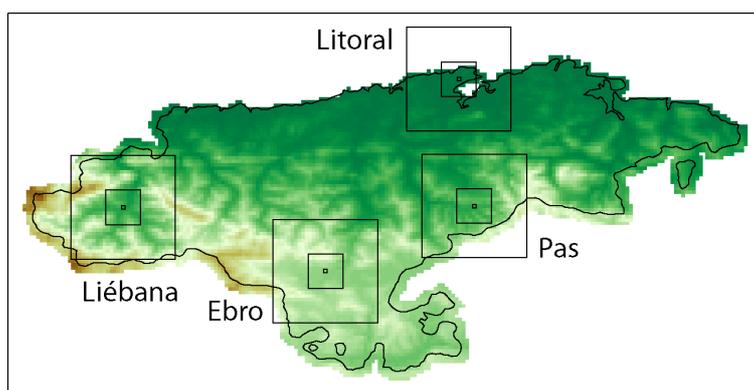


Figura 6.5: Localización de las cuatro regiones seleccionadas como representativas de los diferentes climas de Cantabria. Se muestran los puntos de las rejillas de observaciones de 1km y 10km (en este último caso, los cuadrados interiores) y de la rejilla de 25 km de los modelos regionales del clima (cuadrados exteriores).

La Figura 6.6 muestra los resultados para la temperatura; en la parte superior se incluye el gráfico de dispersión de temperaturas para Cantabria dado por el multi-modelo del IPCC-AR4 (análoga a la Figura 5.4, pero con el escenario A1B). Las cuatro figuras restantes muestran el incremento de temperatura promedio (en °C) dado por el multi-modelo de modelos regionales (RCMs) en las cuatro grandes zonas climáticas de la región: zona litoral, valle del Pas, valle de

Liébana y Ebro. En esta figura se puede ver fácilmente que los modelos regionales presentan una diferencia en la zona Litoral, con un crecimiento más moderado de las temperaturas que en el resto. Este resultado indica que los modelos regionales son capaces de "corregir" o proyectar localmente las simulaciones globales teniendo en cuenta un mayor nivel de detalle (25 km en los modelos considerados) de la orografía y simulando los procesos físicos relevantes a esta mayor resolución. Obsérvese que los escenarios regionalizados sólo llegan hasta el año 2040.

La Figura 6.7 muestra los resultados para la precipitación. En este caso se puede apreciar fácilmente la gran diferencia que existe entre las proyecciones globales y las regionales, tanto en magnitud, como en variabilidad. También se puede apreciar que los modelos regionales presentan menos variabilidad en el Ebro y en el valle de Liébana que en las zonas restantes. En este caso, no se llegan a apreciar disminuciones significativas de precipitación en el período simulado (hasta 2040), pues la incertidumbre es mayor que la señal de cambio.

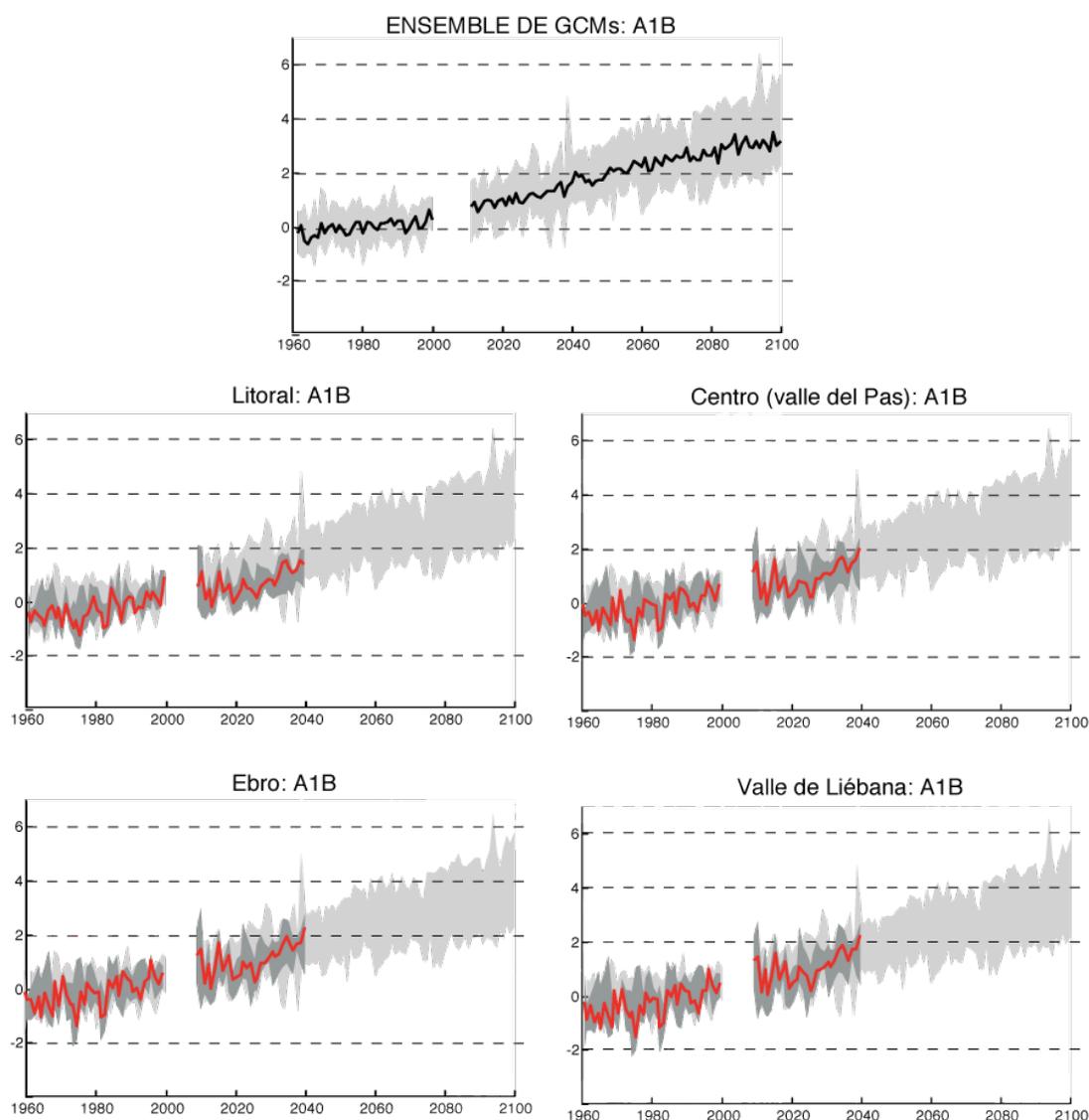


Figura 6.6: Incremento de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) dada directamente por el conjunto de modelos globales del IPCC-AR4 (común para toda Cantabria, figura superior), y dada por el conjunto de modelos regionales (RCMs) en cuatro grandes zonas climáticas de Cantabria: Litoral, Pas, Ebro y Liébana; en estas figuras se muestra de fondo el gráfico de dispersión del modelo global para apreciar los cambios.

Sin embargo, a pesar de que las simulaciones de los modelos regionales permiten caracterizar el clima Litoral y diferenciarlo del resto, la resolución de los mismos (25 km) se queda corta para reflejar las diferencias existentes entre las tres zonas restantes. Para ello sería necesario incrementar la resolución de los modelos y analizar la influencia de la resolución del modelo en los resultados. La siguiente sección analiza este problema.

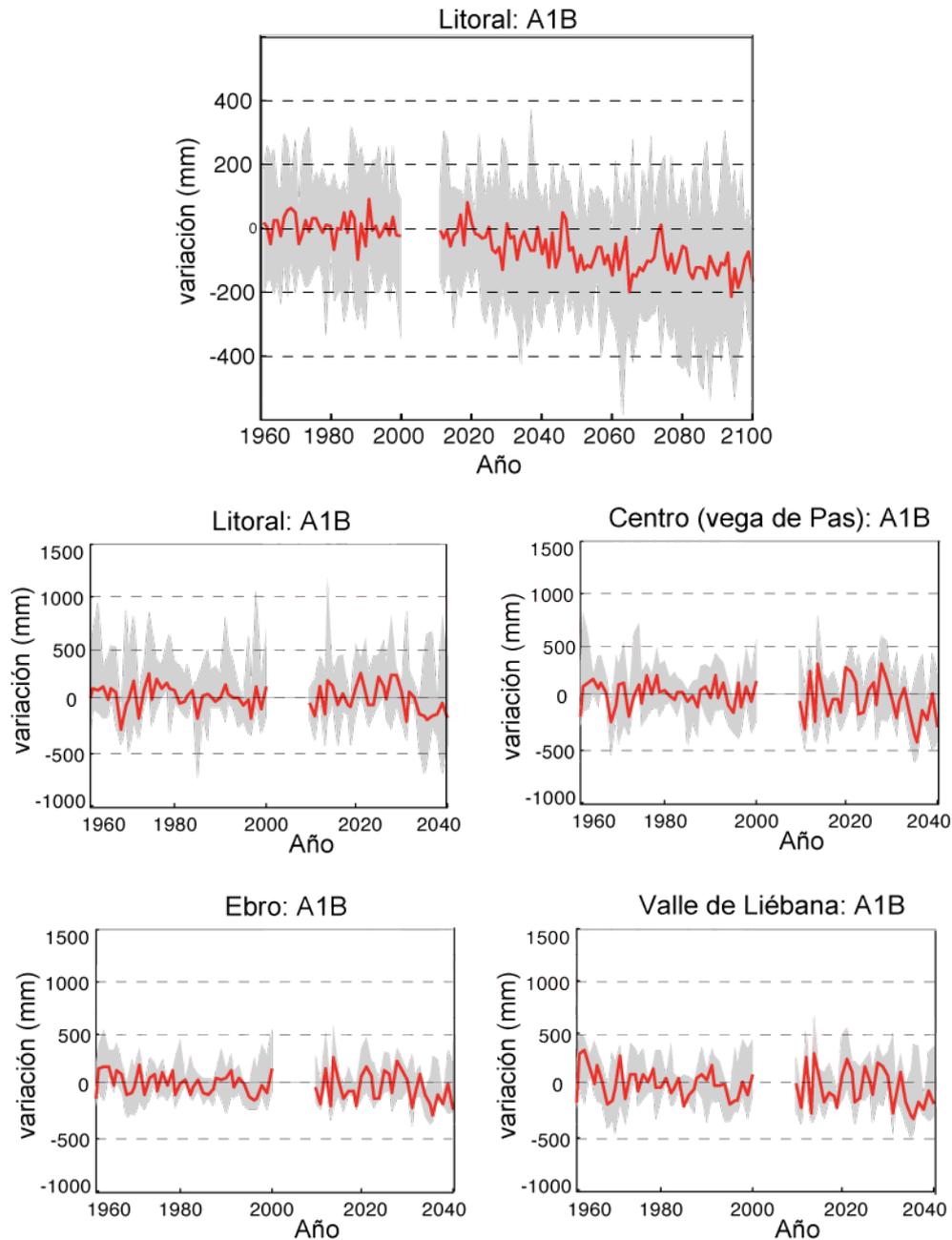


Figura 6.7: Como la Figura 6.6 pero para la precipitación. En este caso, las escalas de la figura superior (modelos globales) y el resto (modelos regionales) son diferentes y, por tanto, no se muestran las figuras superpuestas.

6.4. Impacto de la Resolución Horizontal

Además del análisis de las simulaciones regionales producidas en el proyecto ENSEMBLES, se ha puesto a punto del modelo regional WRF para llevar a cabo una simulación complementaria que de idea del posible impacto que un aumento en la resolución de los RCMs para tener en cuenta las particularidades de nuestra región pudiese tener sobre las variables a estudio. El modelo WRF (Weather Research and Forecasting system, <http://wrf-model.org>) es un sistema de predicción numérica del tiempo en un área limitada diseñado tanto para la predicción operativa como para tareas de investigación de la dinámica atmosférica. Dispone de dos módulos dinámicos para la resolución de las ecuaciones primitivas de la atmósfera, de una amplia variedad de parametrizaciones físicas y de un módulo de asimilación variacional (3DVar). Incorpora los últimos avances en la representación física de la atmósfera, en integración numérica y en asimilación de datos. Está diseñado para ser un sistema de simulación atmosférica de última generación, flexible, portable y eficiente. Esto hace que sea adecuado para un amplio rango de aplicaciones en diferentes escalas espaciales y temporales.

Se ha utilizado el modelo WRF a una resolución horizontal de 5 km, que permite una mejor descripción de las peculiaridades de la región, especialmente de la compleja orografía que caracteriza Cantabria. En particular, se puede distinguir (Figura 6.8) el valle de Liébana y las montañas de la zona del Pas-Miera que no aparecen en las simulaciones de ENSEMBLES (25 km), así como una mejor definición del comienzo de las cadenas montañosas al alejarse de la costa.

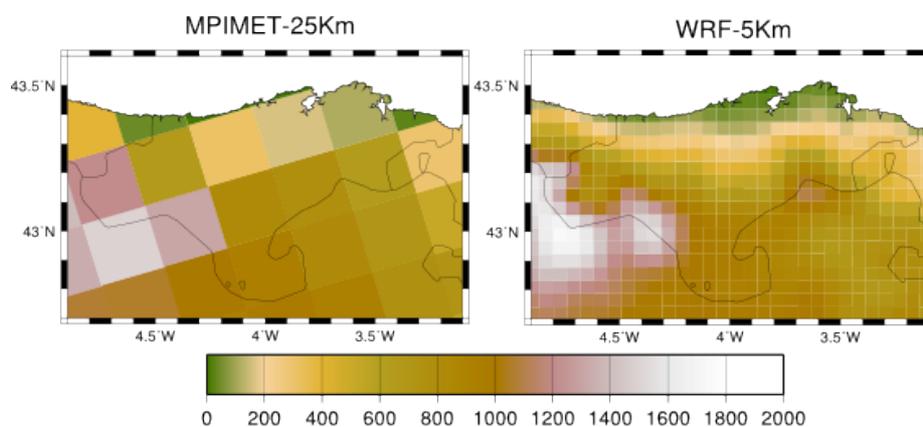


Figura 6.8: Orografía utilizada en la simulación con WRF (5 km) comparada con la del modelo contribuido por MPIMET a ENSEMBLES (25 km de resolución).

Dado el elevado coste computacional de realizar una simulación climática a 5 km de resolución, se plantea únicamente una simulación de 5 años en tiempo presente (periodo 1990-1994) para evaluar las posibles mejoras introducidas por el aumento de resolución. La Figura 6.9 muestra las climatologías estacionales de precipitación para el periodo indicado según la rejilla Cantabria de 10 km y mediante las simulaciones WRF anidadas en el reanálisis ERA40. En general, se aprecia una buena representación de la cantidad de precipitación y de su distribución. Mientras que las simulaciones a 25 km analizadas hasta el momento tendían a dar precipitaciones inferiores a las observadas, la realizada a 5 km da lugar a una sobreestimación de la precipitación, sobre todo en primavera y verano. La sobreestimación se da sobre todo en zonas de alta montaña (Picos de Europa). La precipitación de los modelos numéricos se ve muy afectada por la orografía. Al aumentar la resolución, la altura de las montañas se eleva (Figura 6.8) y esto aumenta la precipitación. La adaptación de las parametrizaciones involucradas al área a estudio y a la resolución empleada requeriría datos fiables en estaciones de alta montaña que actualmente no están disponibles. La discrepancia entre la precipitación simulada y la

observada se da en zonas en las que no hay suficiente cobertura observacional, por lo que puede que parte de la precipitación adicional simulada por el modelo (por ejemplo, en la zona de Picos de Europa) realmente se dé pero no se observe.

La existencia de la nueva red de estaciones meteorológicas de Picos de Europa podrá permitir llevar a cabo en el futuro un estudio más exhaustivo del clima en esta zona, de forma que se conozcan los valores climáticos reales y se puedan ajustar los modelos numéricos de forma apropiada.

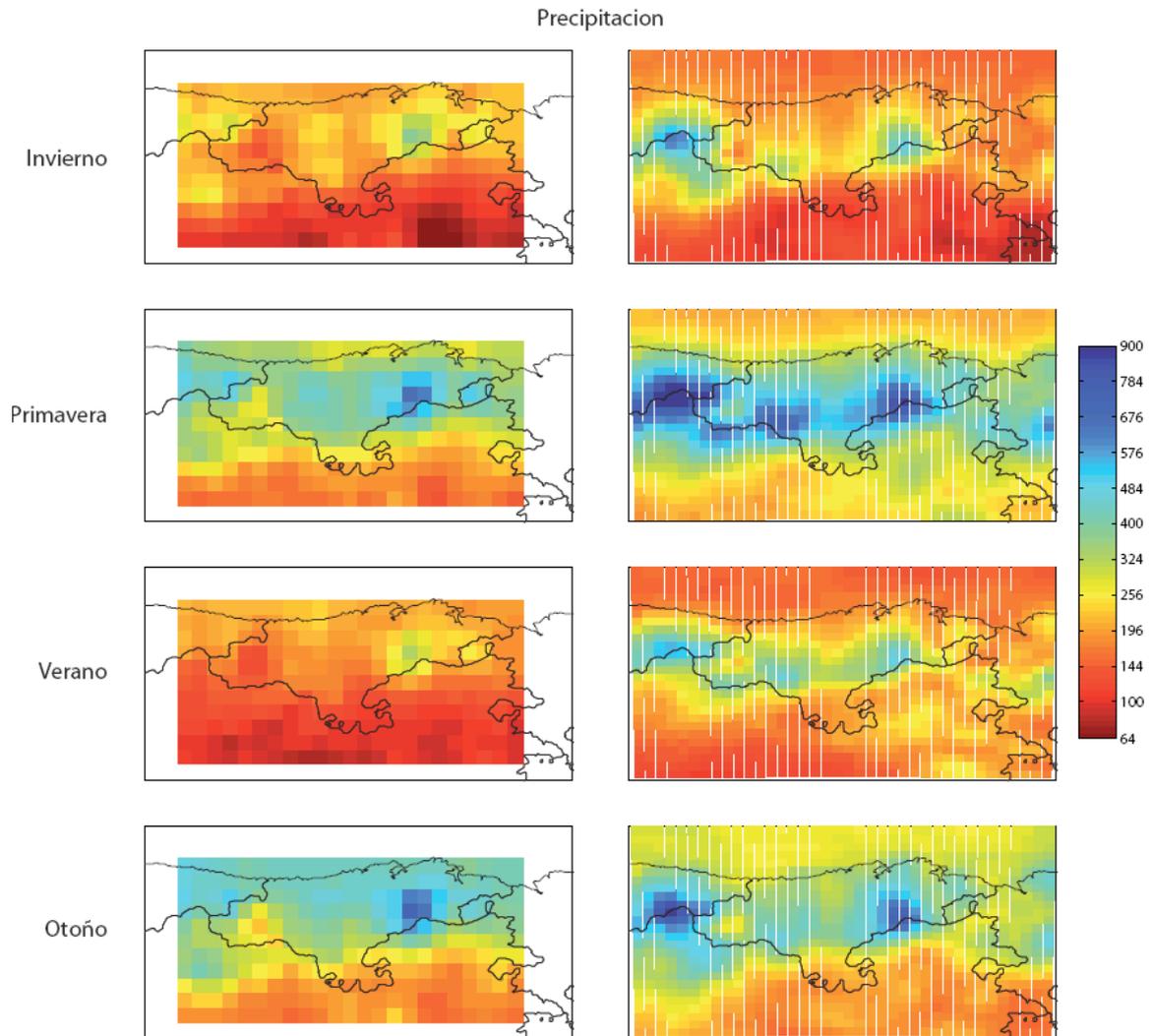


Figura 6.9: Precipitación acumulada estacional en el periodo 1990-1994 según la rejilla de observaciones interpoladas en Cantabria a 10 km y las obtenidas de la simulación con WRF.

CAPÍTULO 7 Regionalización Estadística

Grupo Responsable:
Grupo de Meteorología (Instituto de Física de Cantabria, CSIC-UC)
manuel.gutierrez@unican.es

7.1. Introducción

Los métodos estadísticos de regionalización se basan en el uso de técnicas estadísticas que relacionan de forma empírica las variables climáticas a gran escala proporcionadas por los modelos globales con las variables locales/regionales observadas en una región de interés (en este caso la climatología a 1 km sobre Cantabria). De esta forma se pueden regionalizar las proyecciones de cambio climático realizadas por los modelos globales en distintos escenarios (ver Sección 1.5 para más detalles). La ventaja de estas técnicas de downscaling estadístico es que, además de ser aplicables a variables estándar, como la precipitación y la temperatura, también pueden aplicarse a otras como la altura de oleaje en un punto de rejilla, o la producción de cereales en una región, que son dependientes de la circulación a gran escala, pero que no son proporcionadas directamente por los modelos globales y regionales. Estas características hacen que la regionalización estadística se haya potenciado en los últimos proyectos de cambio climático, que incluyen tareas específicas a este respecto. Por ejemplo, en el proyecto ENSEMBLES (<http://ensembles-eu.metoffice.com>), del VI Programa Marco de la Unión Europea, que constituye el marco de referencia actual para los estudios de escenarios de cambio climático en Europa, se han analizado y validado distintas técnicas de downscaling estadístico, comparando sus resultados con los de las técnicas dinámicas, y se han llevado a cabo distintos estudios sobre aspectos teóricos relacionados con su uso en escenarios de cambio climático. Como resultado de este proyecto, en el que ha colaborado el Grupo de Meteorología de la Universidad de Cantabria, se ha desarrollado un marco metodológico adecuado para llevar a cabo el proceso de regionalización utilizando estas técnicas y se han establecido directrices para la correcta elaboración de escenarios regionales incluyendo una componente probabilística que tenga en cuenta todas las fuentes de incertidumbre; también se han elaborado guías para la difusión de esta información y su uso apropiados en distintos sectores de impacto (ver Goodess et al. 2009 y <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/ensembles/ScenariosPortal>).

Esta metodología y directrices han constituido la base principal del trabajo realizado en el presente proyecto, de cara a proporcionar escenarios regionales probabilísticos de cambio climático de alta resolución en Cantabria bajo distintos escenarios de emisión para temperatura y precipitación en los periodos 2010-40, 2040-70 y 2070-2100. Los resultados y los productos finales obtenidos se describen en detalle en este capítulo.

7.2. Técnicas de Downscaling Estadístico Empleadas

Algunas técnicas de downscaling estadístico se han desarrollado y aplicado en el ámbito de la predicción a corto plazo y han sido posteriormente adaptadas a las escalas propias del cambio climático y al tratamiento de la incertidumbre asociada con la predicción por conjuntos. En este conjunto de técnicas se incluyen los métodos de regresión lineal (regresión múltiple, CCA, etc.) y no lineal (redes neuronales, etc.), y los métodos de condicionamiento o clasificación del tiempo (incluyendo las técnicas de análogos y otras técnicas de agrupamiento). Estas técnicas permiten trabajar con la máxima resolución temporal disponible (diaria en el presente proyecto) y permiten regionalizar los resultados a la escala espacial de las observaciones disponibles. Una descripción más detallada de estas técnicas de downscaling, así como recomendaciones para su uso en la regionalización de cambio climático se tiene en (Benestad *et al.* 2008, Gutiérrez *et al.* 2004; Goodess *et al.* 2010).

En particular, las distintas metodologías de downscaling estadístico se suelen agrupar en dos tipos (sin contar las técnicas de desagregación conocidas como *generadores de tiempo*):

- *Técnicas de regresión o funciones de transferencia*, basadas en modelos lineales o no lineales (e.g., redes neuronales) para inferir las relaciones entre los predictandos (temperatura máxima en superficie, etc.) y los predictores de larga escala (geopotencial en 500mb, etc.). Estos métodos son “generativos” en el sentido que las proyecciones se calculan a partir de un modelo que es obtenido a partir de los datos disponibles.
- *Técnicas de análogos y tipos de tiempo*, basadas en una preclasificación de los patrones de tiempo en un conjunto finito de “tipos de tiempo” obtenidos de acuerdo con su similitud sinóptica. Estos métodos son normalmente “no generativos”, ya que obtienen la proyección a partir de un procedimiento algorítmico. Un ejemplo estándar de este tipo es el método de análogos, en sus distintas versiones.

En este trabajo se han utilizado seis métodos de regionalización estadística que incluyen técnicas de los dos grupos anteriores:

- M1: Un modelo de regresión global (ajustado en todo el período de reanálisis, usando 15 Componentes Principales CPs del patrón atmosférico como predictores).
- M2: Un modelo de regresión local en el tiempo obtenido a partir de 25 tipos de tiempo precalculados (ajustado para cada uno de los tipos de tiempo utilizando 25 CPs como predictores).
- M3: Un modelo de regresión local en el espacio (ajustado sobre todo el período de reanálisis, considerando como predictores los datos de las variables atmosféricas en los cuatro puntos de rejilla más cercanos).
- M4: un modelo de regresión local en tiempo y en espacio (considerando tipos de tiempo y los predictores en los cuatro puntos de rejilla más cercanos).
- M5: Un método de análogos estándar, considerando el valor ocurrido en el patrón histórico más cercano.
- M6: Un método de análogos de tipo *weather typing*, basado en cien tipos de tiempo obtenidos aplicando el algoritmo de k-medias a los patrones de reanálisis.

Después de analizar distintas rejillas espaciales y predictores para caracterizar el estado de la atmósfera en la región de estudio (Cantabria) siguiendo las indicaciones dadas en Gutiérrez *et al.* (2004), se consideraron una única rejilla y un conjunto de predictores óptimos para todos los métodos de regionalización M1-M6. La Figura 7.1 muestra la rejilla considerada en este trabajo (200 km de resolución).

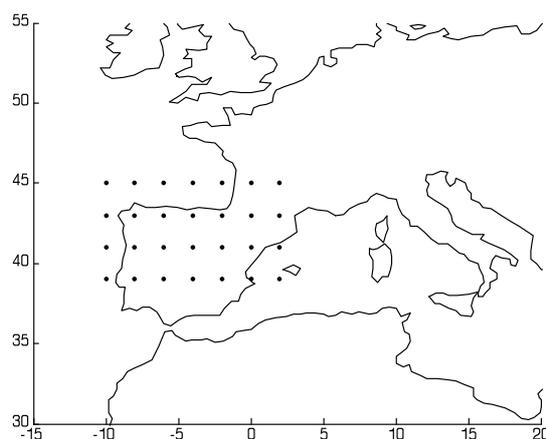


Figura 7.1: Área de estudio y puntos de rejilla (correspondientes a una resolución de 200 km) utilizados para definir los predictores de los métodos de regionalización estadística.

Para definir el estado de la atmósfera sobre la rejilla, se procedió a obtener, postprocesar y almacenar los datos del reanálisis ERA40 del ECMWF 1957-2002 (<http://www.ecmwf.int>), a escala diaria, con los que se ajustaron y validaron los modelos estadísticos en condiciones perfectas. Por otra parte, se almacenaron las salidas (a escala diaria) de un conjunto representativo de GCMs de entre los distintos modelos Europeos del IPCC-AR4 y para los cuales era posible acceder al dato diario de las simulaciones. Obsérvese que aunque el dato agregado mensual para el período 2000-2100 es público para la mayoría de los modelos, el dato diario sólo está disponible para algunos modelos y para intervalos de tiempo futuro particulares (por ejemplo, 2081-2100). Por tanto, ha sido necesario contactar con los proveedores locales (los centros de investigación que realizan las simulaciones) de los modelos europeos para proceder a la recopilación, homogeneización, control de errores y post-procesado de esta información, lo cual ha constituido una de las tareas más laboriosas del proyecto.

La Tabla 7.1 muestra los modelos globales que han sido utilizados finalmente para la generación de los escenarios regionales; en todos los casos se ha considerado la información para los escenarios de emisión B1, A1B y A2 considerando el período completo 2000-2100. Por una parte, la elección de estos modelos ha estado basada en la información disponible. Por otra parte, se ha tenido en cuenta la variabilidad del multi-modelo del IPCC-AR4, según se muestra en las Figuras 5.2 (para temperatura) y 5.3 (para precipitación) para el Mediterráneo occidental. En el caso de la temperatura, existe una gran coherencia entre todos los modelos; en el caso de la precipitación, en el conjunto de proyecciones globales se observan dos patrones de variación futura claramente marcados. En unos casos (ECHAM5, NCAR, etc.) hay un decremento de las precipitaciones en todo el área del Mediterráneo occidental; en otros casos (BCM, MIROC, en menor medida el CNRM, etc.) los patrones de cambio presentan un mínimo de disminución en el eje central, incluyendo España, con aumentos de precipitación al Norte y/o Sur.

Por tanto, finalmente se eligieron tres modelos para la generación de las proyecciones regionales: BCM, CNRM y EHCAM5, que permiten explorar el conjunto de patrones de temperatura y precipitación mostrados por el multi-modelo en el área de influencia de la zona de estudio. De esta manera, para tener en cuenta la incertidumbre de los escenarios globales se han considerado los tres modelos anteriores para los tres escenarios de emisión (B1, A1B y A2), con un total de 9 proyecciones futuras del clima, lo que constituye una muestra representativa, aunque reducida, de la variabilidad observada a escala global. Con la previsible mejora del acceso a los datos de los modelos globales en el próximo informe del IPCC (el AR5, con los modelos del CMIP5 <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5>) sería deseable ampliar el presente estudio para incluir un abanico mayor de modelos globales, que muestre de una forma más amplia la incertidumbre de los escenarios globales.

Tabla 7.1: Lista de modelos globales utilizados para la regionalización estadística en este proyecto (ver Tabla 1.1 para más detalles).

Centro	País	Modelo	Componentes
CNRM	Francia	CNRM-CM3	Modelo atmósfera: Arpege-Climat v3 (T42L45, cy 22b+). Modelo océano: OPA8.1. Modelo de hielo: Gelato 3.10. Modelos de ríos (river routing): TRIP.
MPI. Max Plank Institute	Alemania	MPI-ECHAM5-MPI-OM	Modelo atmósfera: ECHAM5.2.02a (T63L31). Modelo océano: MPI-OM Vers. 1.0 (GR1.5L40).
BCCR. Bjerknes Centre for Climate Research	Noruega	BCCR_BCM2	Modelo de atmósfera: ARPEGE V3 T63L31 (cy 22b+). Modelo de océano: NERSC-MICOM V1.0 (based on MICOM V2.8). Modelo de hielo: NERSC Sea Ice Model (Viscous-plastic + thermodynamic). Modelo de suelo: ISBA ARPEGE V3 version.

Para cada uno de estos modelos, y también para el reanálisis, se consideró un conjunto de variables sobre la rejilla mostrada en la Figura 7.1 que permiten definir el estado de la atmósfera. Estas variables son los predictores para el método de regionalización, que permiten proyectar las simulaciones globales a nivel regional. Inicialmente, se analizó el conjunto común de variables mostradas a continuación.

Variable	Código	Niveles (mb)	Hora	Unidades	Comentarios
Geopotential	Z	200, 500, 700, 850, 925, 1000	00,12	m**2 s**-2	Valor instantáneo
V velocity	V	200, 500, 700, 850, 925, 1000	00,12	m s**-1	Valor instantáneo
U velocity	U	200, 500, 700, 850, 925, 1000	00,12	m s**-1	Valor instantáneo
Temperature	T	200, 500, 700, 850, 925, 1000	00,12	K	Valor instantáneo
Relative humidity	R	200, 500, 700, 850, 925, 1000	00,12	%	Valor instantáneo
Sea Level Press.	MSLP	2D	00,12	Pa	Valor instantáneo
2m Temperature	2T	2D	00,12	K	Valor instantáneo
10m N. Wind	10V	2D	00, 12	m s**-1	Valor instantáneo
10m E. Wind	10U	2D	00, 12	m s**-1	Valor instantáneo
Total Water	TCW	2D	00, 12	kg m**-2	Agua total en la vertical (vapor+agua/hielo nubes)

Finalmente, tras evaluar la calidad y la robustez de estos predictores (comparando las distribuciones de valores del reanálisis con las de los tres modelos globales) se tomaron como predictores para los seis métodos de downscaling M1-M6 los campos Z, U y V en 1000 mb, T y R en 850 mb y 2T, considerando los valores de las 00 y 24 horas para definir el patrón dinámico correspondiente a cada día analizado.

Previo a la aplicación de los métodos se realizó un análisis de Componentes Principales (CPs) para obtener predictores que representen la variabilidad espacial de la región considerada. Por otra parte, también se aplicaron técnicas de agrupamiento para definir un número finito de “tipos de tiempo” (weather types) para aplicar las técnicas que requieren localización temporal; en este caso se analizaron agrupaciones con 25 y 50 tipos de tiempo, para obtener un el número mínimo de tipos de tiempo que caracterice tanto la variabilidad climática, como las tendencias futuras del cambio climático dadas por las proyecciones de los modelos globales.

7.3. Variabilidad de los Tipos de Tiempo

Para obtener un número dado de tipos de tiempo en base a los patrones atmosféricos definidos por la rejilla de la Figura 7.1 y las variables antes descritas, se pueden aplicar técnicas de agrupamiento jerárquico o particional; en particular, en este trabajo se considera una técnica de agrupamiento particional, las redes auto-organizativas (o SOM en inglés), que tienen la propiedad de representar los tipos de tiempo distribuidos regularmente en una retícula, de forma que tipos de tiempo similares estarán situados cerca en la retícula, mientras que tipos de tiempo más distintos estarán alejados en la misma (Gutiérrez et al., 2004). Esta propiedad resulta particularmente interesante cuando interesa analizar las distribuciones de los tipos de tiempo en un período concreto y estudiar su evolución y tendencias en períodos distintos. En particular esta propiedad permitirá definir distribuciones continuas de tipos de tiempo en un soporte apropiado (la retícula bidimensional considerada).

La Figura 7.2 muestra la retícula obtenida al aplicar el algoritmo SOM para calcular 25 tipos de tiempo distintos para el período 1960-2000, considerando datos de reanálisis, que representan la “realidad” observada de la atmósfera. Los 14600 patrones diarios correspondientes a este período son segmentados en 25 grupos distintos con una distribución de frecuencias característica, representada por el tamaño de los círculos en el centro de cada una de las cuadrículas de la figura; así, los grupos más frecuentes se sitúan en las “esquinas” de la retícula.

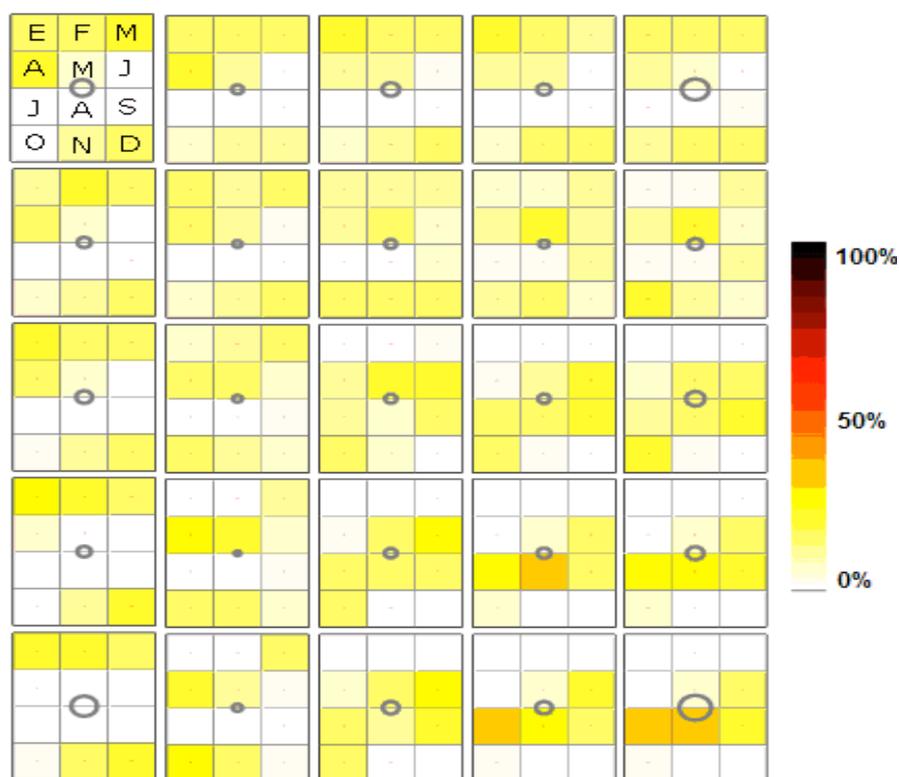


Figura 7.2: SOM con 25 tipos de tiempo mostrados reticularmente (5x5) junto con la frecuencia de los distintos meses en cada clase, obtenido a partir de los datos diarios del reanálisis ERA-40.

Por otra parte, para cada tipo de tiempo, la figura anterior muestra una matriz de 12 elementos que indican la distribución relativa de los días de ese grupo en los distintos meses, de Enero a Diciembre, de izquierda a derecha y de arriba abajo (cada fila de la matriz corresponde a una estación distinta) representadas por una gama de colores (entre 0 y 100%). Así el grupo de la

parte superior izquierda de la retícula tiene un número relativamente alto de patrones que, a su vez, corresponden mayoritariamente a los meses de invierno: enero, febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre. Por otra parte, la esquina inferior derecha corresponde a días de verano: junio, julio, agosto y septiembre.

Una forma objetiva de analizar la variabilidad regional del clima futuro es a través de las variaciones producidas en la distribución de tipos de tiempo sobre esta retícula cuando se considera un período futuro simulado por un modelo global. Sin embargo, previo a ese análisis resulta necesario comprobar que las distribuciones de tipos de tiempo generados por el modelo global en el pasado coinciden con las del reanálisis (Fig. 7.2). Para ello se utilizan los datos simulados por el modelo global (en este ejemplo el modelo ECHAM5) considerando un escenario de control (20c3m) en el siglo XX, extrayendo los datos de variables atmosféricas sobre la rejilla de la Figura 7.1 en el período común con el reanálisis: 1960-2000. La Figura 7.3 muestra la distribución de días simulados por el modelo ECHAM5 sobre la retícula de tipos de tiempo. Comparando esta figura con la anterior se pueden observar ligeras diferencias en cuanto a la frecuencia de cada tipo de tiempo, pero una gran concordancia en la distribución mensual de cada grupo.

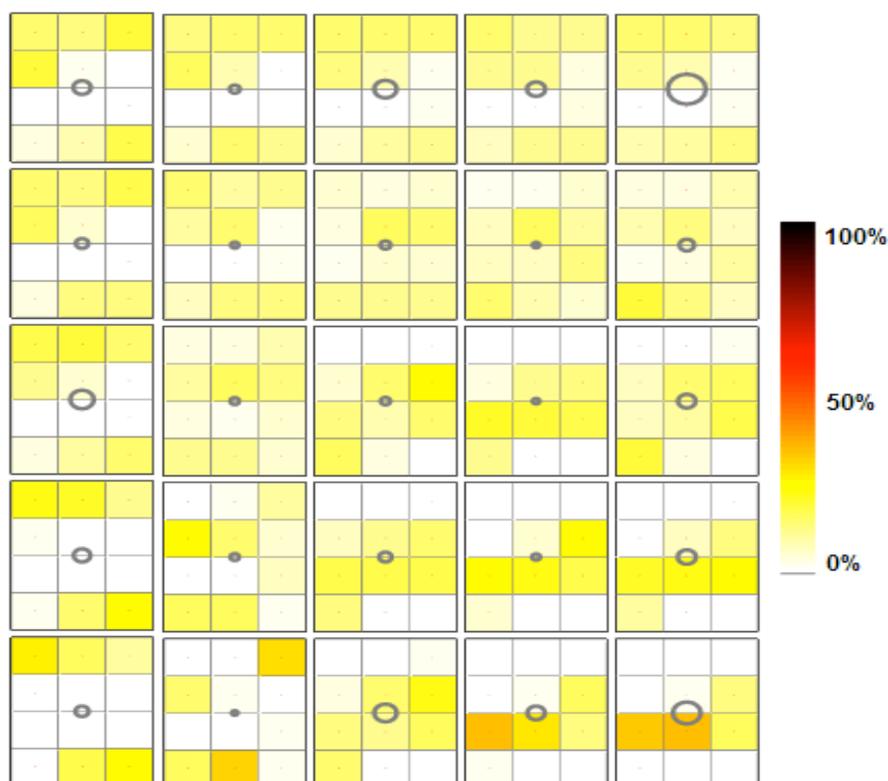


Figura 7.3: Como la Figura 7.2, pero con las frecuencias correspondientes a las simulaciones diarias del modelo ECHAM5 durante el mismo período de reanálisis (escenario de control 20c3m).

Una vez comprobada esta coherencia, la Figura 7.4 muestra las nuevas distribuciones de tipos de tiempo correspondientes a las simulaciones del modelo ECHAM5 en los períodos 2041-2070 (izquierda) y 2071-2100 (derecha) para el escenario A1B. En estas figuras puede observarse que el cambio climático se produce por una creciente presencia de los tipos de tiempo asociados a tiempo de verano en el clima actual (como el tipo de tiempo de la esquina inferior derecha) que copan un rango mayor de meses en el futuro.

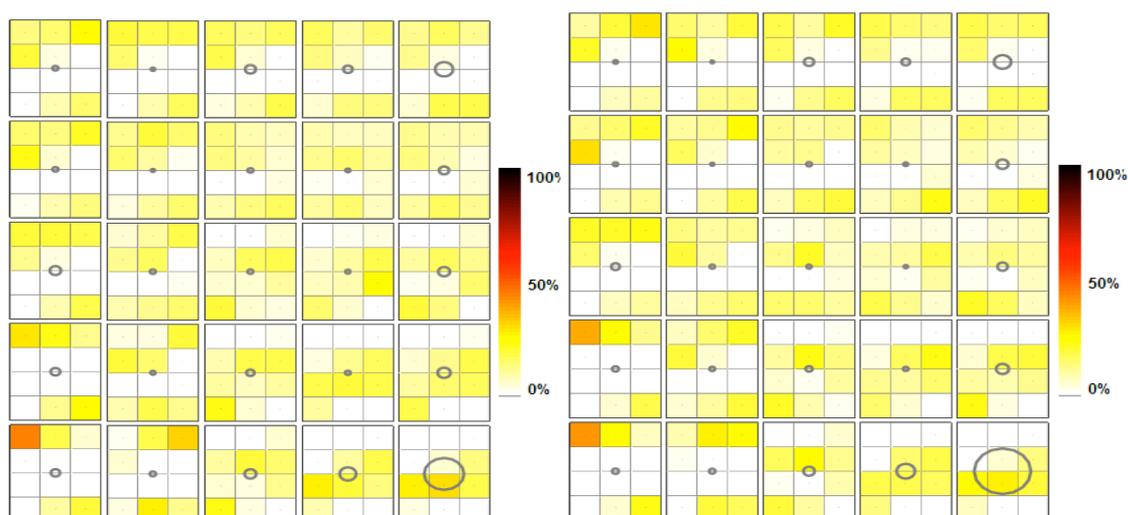


Figura 7.4: Como la Figura 7.3, pero para 2041-2070 (izquierda) y 2071-2100 (derecha).

7.4. Robustez de las Técnicas Estadísticas en Clima Futuro

Una de las principales críticas que se hacen al uso de métodos estadísticos para proyectar regionalmente los escenarios de cambio climático es que los modelos estadísticos empleados se ajustan con datos del clima presente y, por tanto, podrían no ser adecuados si las condiciones climáticas cambiasen como, por ejemplo, en una situación de cambio climático. Este problema todavía no tiene una respuesta concluyente por lo que en este proyecto se abordó una primera aproximación al mismo considerando períodos fríos y cálidos de clima presente (ver Figura 7.5) para entrenar y validar los métodos de regionalización estadística respectivamente. Se utilizaron los seis métodos descritos en el apartado anterior y se analizó su capacidad de generalizar las relaciones estadísticas establecidas en el período frío para reproducir las observaciones (temperatura) del período cálido. Para considerar condiciones extremas en el experimento, se analizan exclusivamente los resultados obtenidos en verano (junio-julio-agosto), donde se observan los valores anuales máximos de temperatura (las temperaturas de verano de la última década no se han registrado en ninguna de las estaciones del período considerado). Este experimento proporcionará una estimación de la robustez de los métodos estadísticos para generalizar las condiciones del clima futuro. De esta forma se obtiene una estimación de la robustez de las técnicas de regionalización estadística en condiciones clima cambiante.

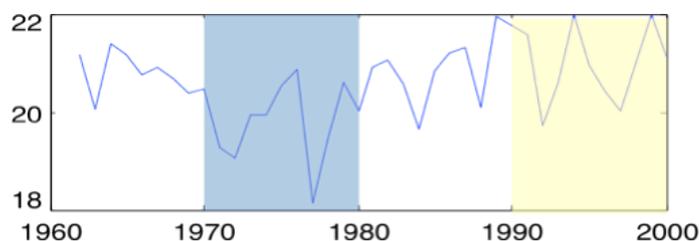


Figure 7.5. Temperaturas media sobre la región norte de la Península Ibérica, mostrando los períodos frío (en azul, 1970-1980) y cálido (amarillo, 1990-2000) empleados.

Para comprobar la influencia de los períodos cálido y frío en la capacidad de generalización del método de regionalización, se realiza inicialmente un experimento de validación cruzada (cross-validation). Se aplican los seis métodos de downscaling con tres períodos de entrenamiento diferentes para predecir las observaciones de la rejilla sobre el Norte de España interpoladas a una rejilla de 50km (ver Herrera et al. 2010): período completo (1960-2000), período frío

(1970-1980) y período cálido (1990-2000), y considerando el mismo período de validación para todos ellos (1960-2000). Para los métodos basados en regresión la intersección entre los períodos de entrenamiento y validación no afecta a los resultados. Para los métodos basados en weather typing, se considera una ventana de exclusión de un año alrededor de cada día para el que se buscan análogos. Como medida de validación se empleó la varianza explicada calculada con la siguiente expresión:

$$Var_{exp} = 1 - \frac{Var(error)}{Var(obs)} (\%)$$

En la Figura 7.6 se muestra el porcentaje de varianza explicada por la predicción diaria obtenida con el método de regionalización M1. En la primera columna se utilizan los campos de ERA40 como predictores mientras que en la columna de la derecha se muestra el caso del escenario de control 20c3m del modelo ECHAM5. En el caso de ERA40 se obtiene una varianza explicada media de 79,73% considerando todo el período de entrenamiento (baja hasta un 75% en el caso de considerar el período cálido) lo que indica el buen funcionamiento del método que, además, permanece estable en condiciones de clima cambiante. Sin embargo, en el caso del modelo ECHAM5, no hay acierto en la predicción (varianza explicada igual a cero o negativa) ya que los predictores no se corresponden día a día con las observaciones (por tanto, el error tiene el rango de la climatología). Igualmente, se consideró como entrenamiento el período frío y el período cálido como validación obteniendo resultados similares de varianza explicada (75%).

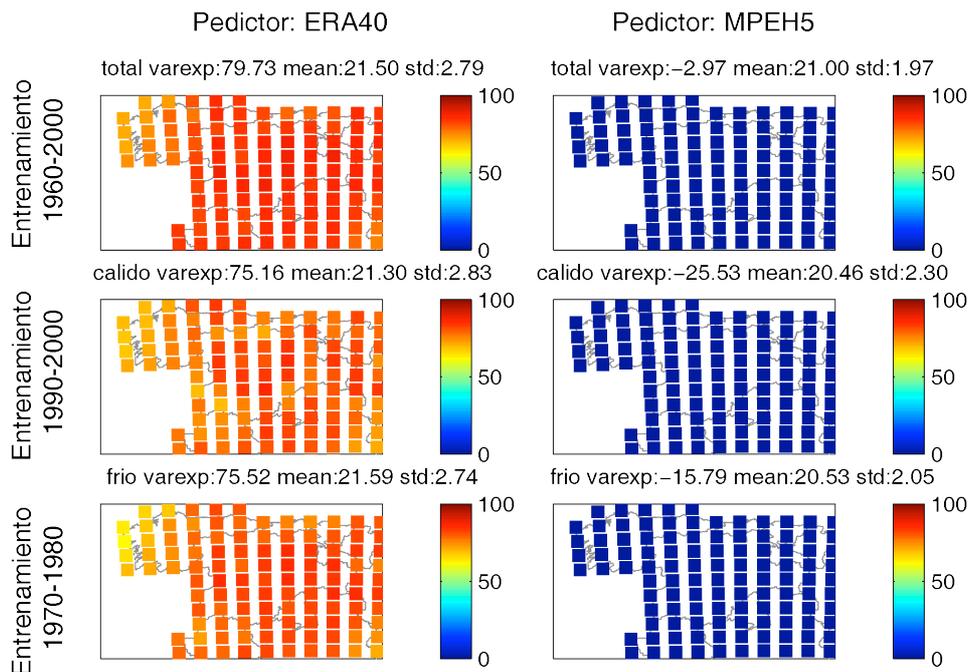


Figura 7.6. Varianza explicada de los períodos 1960-2000, 1990-2000 y 1970-1980 (en filas) usando ERA40 (izquierda) y ECHAM5 (derecha) como predictores para temperatura de la base de datos Spain02 (método M1). El título de cada subgráfica muestra el error medio (RMSE en décimas de °C) y la desviación estándar.

Con el resto de métodos de regionalización se obtuvieron resultados similares. En particular los métodos que mostraron mejores resultados de varianza explicada para el experimento de validación cruzada en el período 1960-200 fueron, por este orden, M2 (84%), M1 (80%) y M5 (78%); en los tres casos, los resultados variaron de forma similar al considerar un período de entrenamiento cálido o frío. De esta forma se comprueba que, al menos, en el futuro cercano los métodos de regionalización estadística permiten "generalizar" los resultados aprendidos y capturar la variación futura de temperaturas incluso en casos nunca ocurridos con anterioridad (como los episodios cálidos de validación).

El estudio mostrado en esta sección fue ampliado en el marco del proyecto ENSEMBLES, considerando como pseudo-observaciones los valores dados por un modelo regional acoplado al modelo global ECHAM5, de forma que se pudo evaluar el error de los métodos estadísticos de regionalización no sólo en períodos cálidos del clima presente, sino también en períodos futuros con diferencias previstas de mayor magnitud. Los resultados obtenidos en este caso mostraron que las técnicas de análogos, sin capacidad de extrapolación, presentaban problemas para reproducir adecuadamente las pseudo-observaciones de temperatura del modelo regional para la segunda mitad del siglo XXI; en particular, estos modelos subestiman significativamente el calentamiento (ver Goodess, Gutiérrez et al. 2009, pag. 69). Por tanto, como resultado de este trabajo conjunto entre ambos proyectos se concluyó que los métodos de downscaling estadístico basado en análogos no son robustos para proyectar regionalmente valores futuros de temperatura.

7.5. Comparación de Observaciones y Proyecciones en un Período de Control

Tras validar la capacidad predictiva de las distintas técnicas de downscaling estadístico descritas en la Sec. 7.2 en "condiciones perfectas" (es decir, utilizando datos de reanálisis y observaciones simultáneas) se concluyó que para la región de estudio las mejores resultados se obtienen con la técnica M2, un modelo de regresión local condicionada a tipos de tiempo, seguido por las técnicas basadas en análogos M5 y M6. El modelo M1 ofrece peores resultados en términos del error cuadrático medio de las proyecciones y las técnicas locales en el espacio (M3 y M4) mostraron ser espacialmente inhomogéneos (obsérvese que las proyecciones locales de distintos puntos están basadas en predictores distintos). Por tanto, se eligieron las técnicas M2 y M6, un representante de cada categoría de métodos, para producir los escenarios regionales de cambio climático. Para ello, se aplicaron estas técnicas a las salidas globales de los tres GCMs disponibles (BCM, CNRM y ECHAM5) en los tres escenarios (B1, A1B y A2) para el período 2011-2100, calculando los valores proyectados diarios en la rejilla de observaciones interpoladas de 1km. Adicionalmente, también se calcularon las proyecciones regionales de los modelos globales en un período de control (escenario 20c3m), de forma que pudiesen compararse las distribuciones observadas y proyectadas con ambas técnicas de downscaling.

Las Figuras 7.7 y 7.8 muestran una comparación de las distribuciones de temperatura media (media de la máxima y la mínima) y precipitación correspondientes a las observaciones y las proyecciones en el período de control (1973-2003, escenario 20c3m), analizando también la variabilidad estacional. Para ello, se calcularon las funciones de probabilidad observadas y proyectadas de cada estación del año en ese período, considerando las cuatro zonas representativas del clima de Cantabria mostradas en la Figura 6.5. La Figura 7.7 muestra los resultados para la temperatura media en las distintas zonas (en columnas) para observaciones (fila superior) y proyecciones con los métodos de regionalización M2 y M6 (filas inferiores). En esta figura puede comprobarse que las técnicas de downscaling estadístico capturan correctamente la variabilidad estacional observada en las series, estableciendo correctamente los valores medios estacionales, pero subestimando ligeramente la variabilidad, especialmente en Inverno y con el método M6. Por tanto, se puede establecer que las técnicas de regionalización reproducen apropiadamente el régimen medio estacional de la temperatura en las diferentes zonas, pero podrían presentar deficiencias para caracterizar regímenes extremos; de hecho, sería necesario aplicar técnicas de regionalización especiales para proyectar apropiadamente valores extremos, o valores atípicos alejados del centro de la distribución, pero esa tarea está fuera de los objetivos de el presente proyecto.

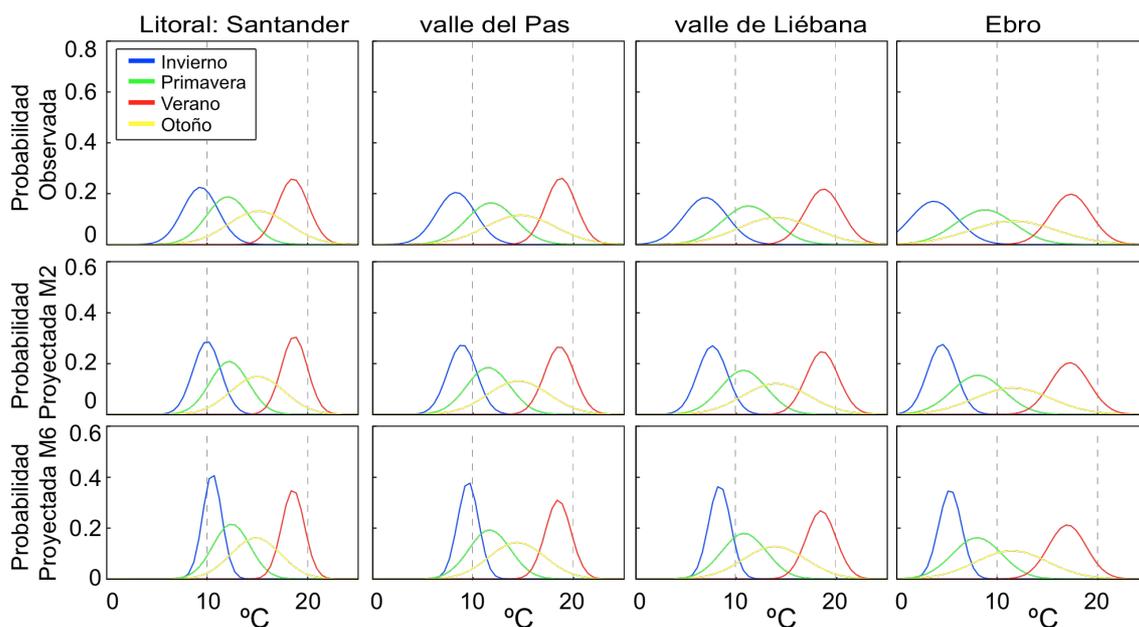


Figura 7.7: Funciones de probabilidad de la temperatura media ($^{\circ}\text{C}$) observada (fila superior) y proyectada con las técnicas de downscaling estadístico M2 y M6 (inferiores) para las cuatro estaciones del año, en las cuatro grandes zonas climáticas de Cantabria: Litoral, Pas, Liébana y Ebro. Las funciones de probabilidad se han obtenido ajustando una distribución gaussiana a los valores mensuales de cada estación.

De forma análoga al caso anterior, la Figura 7.10 compara las distribuciones de la precipitación observadas y proyectadas en el período de control, siendo ahora el Verano la estación con mayores diferencias de variabilidad.

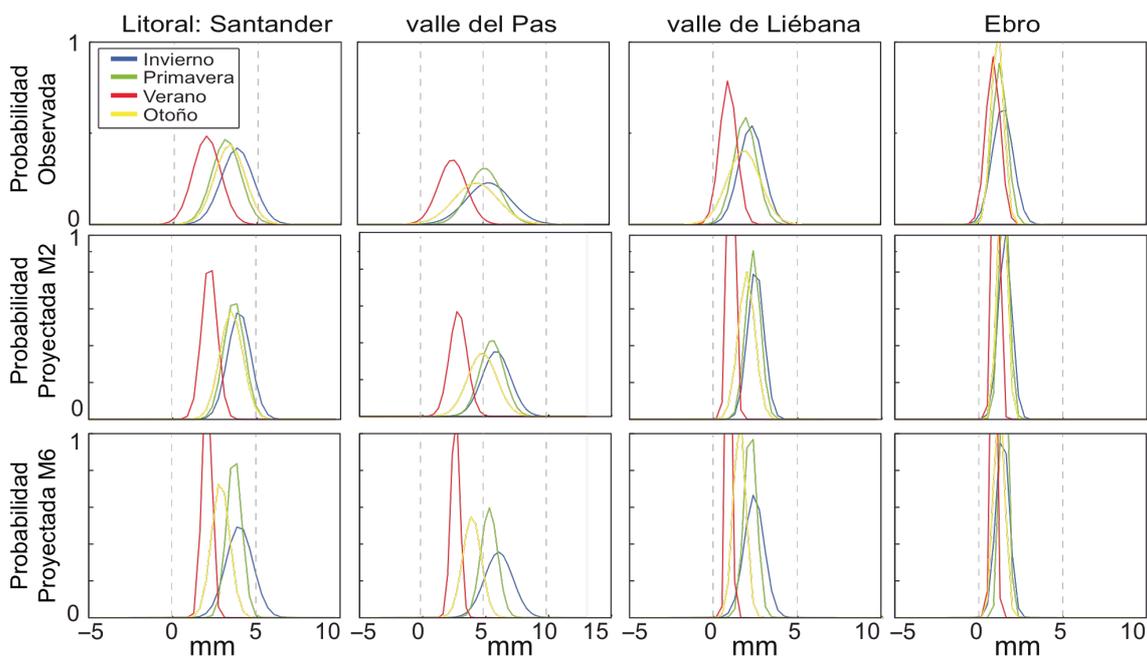


Figura 7.8: Como la Figura 7.7 pero para la precipitación (mm/día). Las funciones de probabilidad se han obtenido ajustando una distribución gaussiana a los valores estacionales individuales de cada año.

Como conclusión de este trabajo se obtiene que, al utilizar un período de control en el siglo XX, los modelos estadísticos de regionalización son capaces de "corregir" o proyectar localmente las simulaciones globales reproduciendo las distribuciones observadas y ofreciendo un mayor nivel de detalle (1 km en los modelos considerados) que las técnicas de regionalización dinámica. Si se tienen en cuenta también los resultados de la Sección 7.4, relativas a la robustez de estos resultados cuando se extrapolen a escenarios futuros, tendría que descartarse el uso de las técnicas basadas en análogos (M5 y M6) para regionalizar la temperatura. Por tanto, finalmente se han considerado las metodologías M2 y M6 para regionalizar la precipitación y únicamente la metodología M2 para regionalizar la temperatura.

Una vez establecida la validez de la metodología estadística para regionalizar las proyecciones de cambio climático, se procedió a analizar los resultados de los distintos períodos y escenarios futuros siguiendo las mismas pautas de los capítulos anteriores, de forma que se puedan comparar los resultados obtenidos con las distintas técnicas. Así, de forma similar a como se realizó en las Secciones 5.3 (escenarios globales) y 6.3 (escenarios regionalizados con técnicas dinámicas), las Figuras 7.9 y 7.10 resumen la información probabilística de las proyecciones del *ensemble* multi-modelo multi-técnica de downscaling (para la precipitación) mediante una serie temporal que muestra la evolución, año a año, del valor medio y la dispersión de la temperatura y precipitación del *ensemble* para el escenario A1B. En particular, se analizan los resultados en las cuatro zonas representativas del clima de Cantabria mostradas en la Figura 6.5 (puntos interiores en cada zona), con una resolución mayor que con las técnicas dinámicas (rectángulos exteriores).

La Figura 7.9 muestra los resultados para la temperatura que, al igual que ocurría en la Fig. 6.6 para el caso de regionalización con modelos dinámicos (RCMs), indican un crecimiento más moderado de las temperaturas proyectadas en la zona Litoral. Adicionalmente, en este caso se muestran también las observaciones de los puntos de rejilla de 1km correspondientes en el período 1957-2000, para que puedan contrastarse las observaciones con las proyecciones regionales en un período de control. Como puede observarse en estas figuras, aparte de la conocida deficiencia de los modelos para representar el mínimo de temperaturas en torno al año 1970 (característico de Europa occidental), la tendencia de las proyecciones en el período de control se corresponden razonablemente con las observaciones; nótese que la variabilidad anual de estas series no ofrece ninguna información relevante sobre las técnicas de regionalización y sólo las tendencias u otro estadístico obtenido en un período climático (interdecadal) permiten establecer conclusiones válidas a la escala climática a la que se realizan las simulaciones. Las proyecciones futuras resultantes muestran una tendencia más suave de calentamiento en el Litoral y, en menor medida, en el valle del Pas, zonas de influencia Atlántica, mientras presentan tendencias similares a las dadas por el escenario global en Liébana y en el Ebro. A grandes rasgos, los resultados en el período común son muy parecidos a los que se obtuvieron con técnicas dinámicas.

La Figura 7.10 muestra los resultados para la precipitación, donde las proyecciones estadísticas caracterizan de forma apropiada tanto la variabilidad como las tendencias observadas en cada región en el período de control. En este caso se puede apreciar fácilmente la diferencia que existe con las proyecciones globales y regionales dinámicas mostradas en la Figura 6.7, que presentan regímenes más suavizados y homogéneos, con menos contrastes entre regiones. Las proyecciones estadísticas futuras muestran una significativa reducción de la precipitación en todas las regiones durante la segunda mitad de siglo (en las siguientes secciones se muestran resultados más detallados de esta reducción).

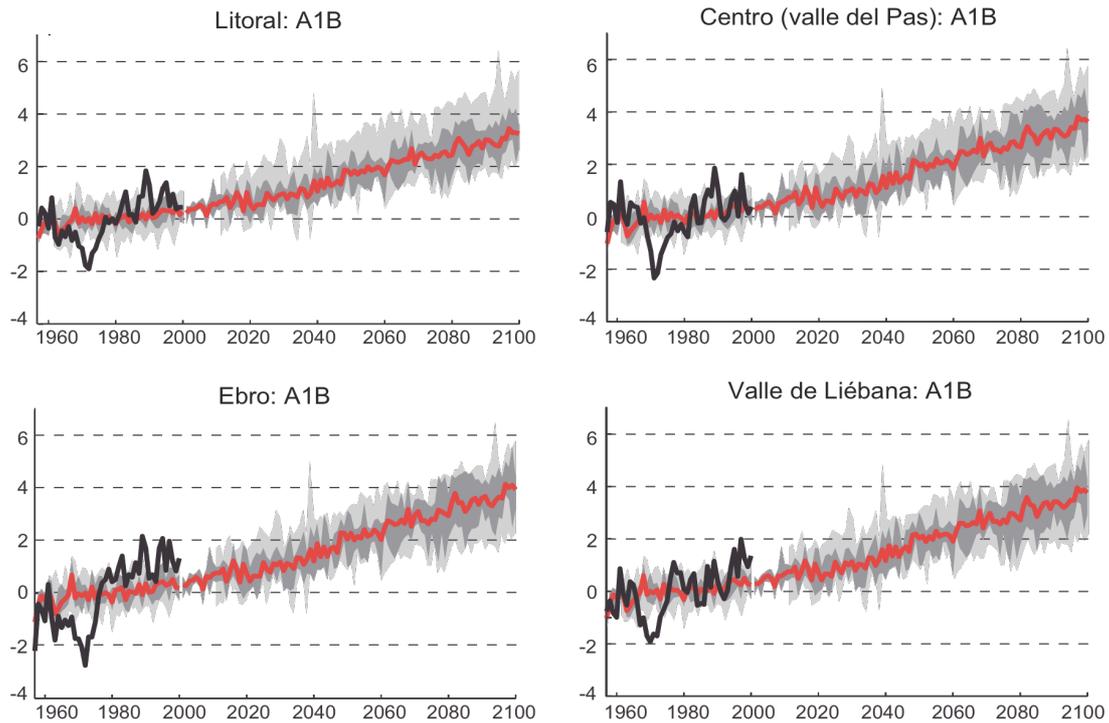


Figura 7.9: Incremento de la temperatura media ($^{\circ}\text{C}$) dada por las proyecciones regionales estadísticas en cuatro grandes zonas climáticas de Cantabria: Litoral, Pas, Ebro y Liébana. La curva roja muestra la media del ensemble y la sombra gris oscuro muestra la incertidumbre o variabilidad; en estas figuras se muestra en fondo gris claro el gráfico de dispersión de los modelos globales para apreciar los cambios y con una curva negra las observaciones correspondientes de los puntos de rejilla.

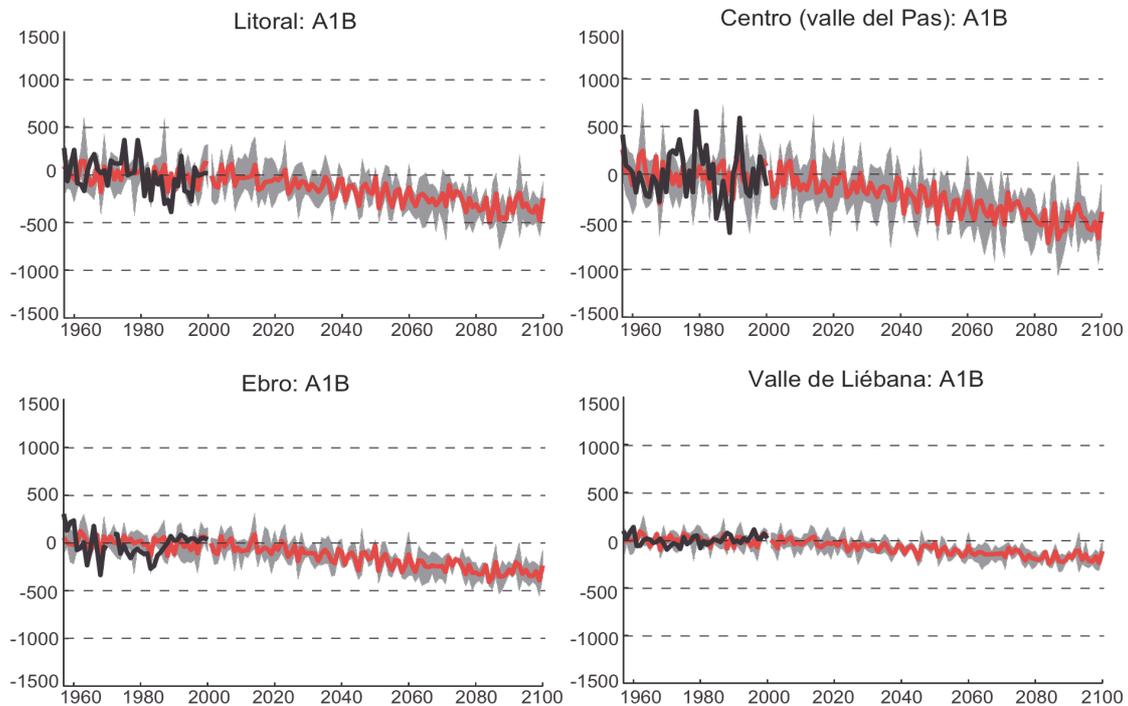


Figura 7.10: Como la Figura 7.9 pero para la precipitación. En este caso, al igual que en la Fig. 6.7, no se muestran de fondo las curvas de dispersión de los modelos globales. En la serie observada del Ebro se ha eliminado el valor del año 1971 al detectarse un outlier, pero obsérvese que está fuera del período de control utilizado en los cálculos.

De cara a evaluar el efecto que habría tenido incluir el método de downscaling basado en análogos (M6) en las proyecciones de temperatura se ha calculado una figura equivalente a la Fig. 7.9, pero utilizando esta técnica de downscaling en lugar de la técnica M2. Obsérvese que aunque las proyecciones del período de control son muy similares al caso anterior, las proyecciones futuras muestran una subestimación notable de las temperaturas, debido al hecho de la falta de robustez mencionado en la Sección 7.4. Este ejemplo pone de manifiesto la enorme importancia que tiene analizar la robustez de las técnicas de regionalización que se emplean en este tipo de trabajos (tanto las técnicas de downscaling estadístico como las parametrizaciones utilizadas en los modelos dinámicos). Desgraciadamente, este tipo de estudios son todavía muy limitados y no suelen incluirse o considerarse en los distintos trabajos de regionalización que se acometen en distintas regiones del mundo. Este hecho confiere un valor adicional al trabajo realizado en este proyecto, que se sitúa a la vanguardia de este tipo de estudios que, necesariamente, tendrán que estar presentes en los futuros trabajos de regionalización que se lleven a cabo.

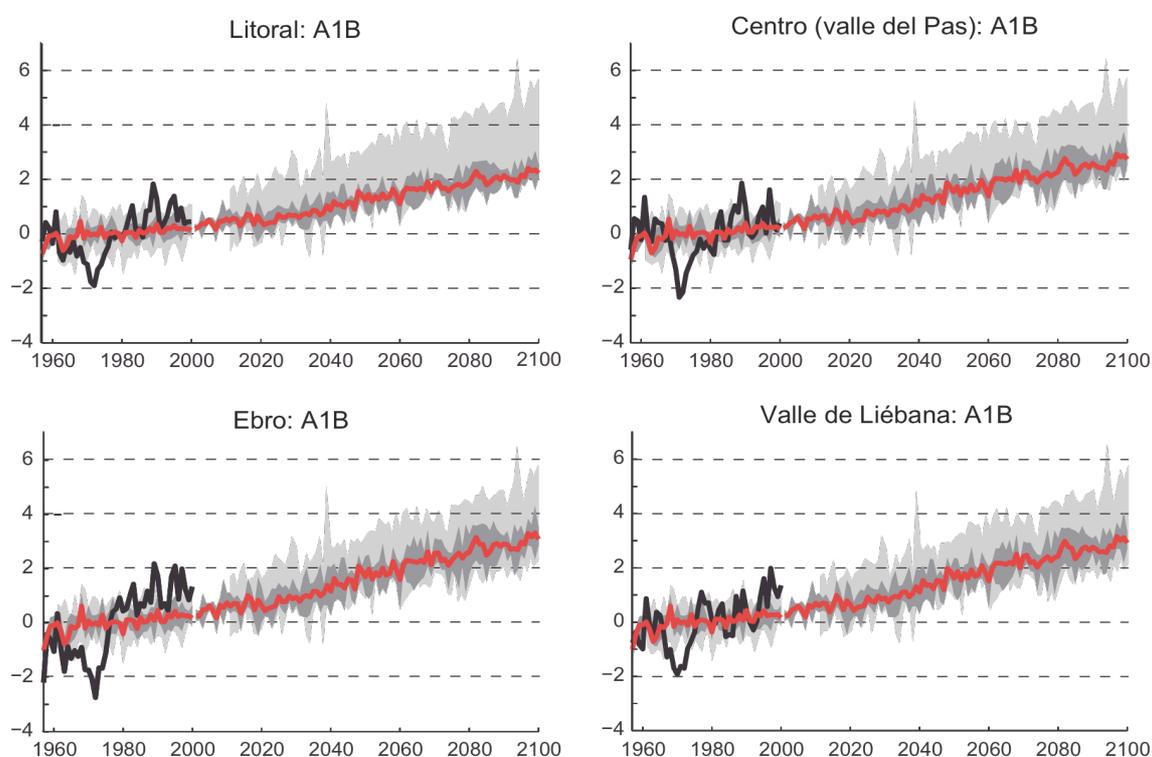


Figura 7.11: Como la Fig. 7.9 pero utilizando el método de regionalización M6.

Finalmente, se procedió a evaluar el peso relativo de cada una de las fuentes de incertidumbre (escenarios y modelos globales) en los resultados. Las Figuras 7.12 y 7.13 muestran las funciones de probabilidad de los incrementos estacionales de temperatura media en los períodos 2011-40 y 2071-2100, respectivamente, respecto de los valores simulados en el período de control. Cada columna corresponde a una zona distinta y cada fila a un experimento de sensibilidad: 1 (escenario) + 1 (modelo) en la primera fila, 3+1 en la segunda, 1+3 en la tercera y 3+3 en la última. En el primer período de tiempo no se observan diferencias notables entre los escenarios construidos en base a un único modelo y escenario. Sin embargo, en el segundo período, 2071-2100, se muestra una mayor variabilidad de los resultados al considerar el ensemble de modelos y se muestra una mayor tendencia al considerar el ensemble de escenarios (a la que contribuyen los escenarios A1B y A2 en detrimento de B1).

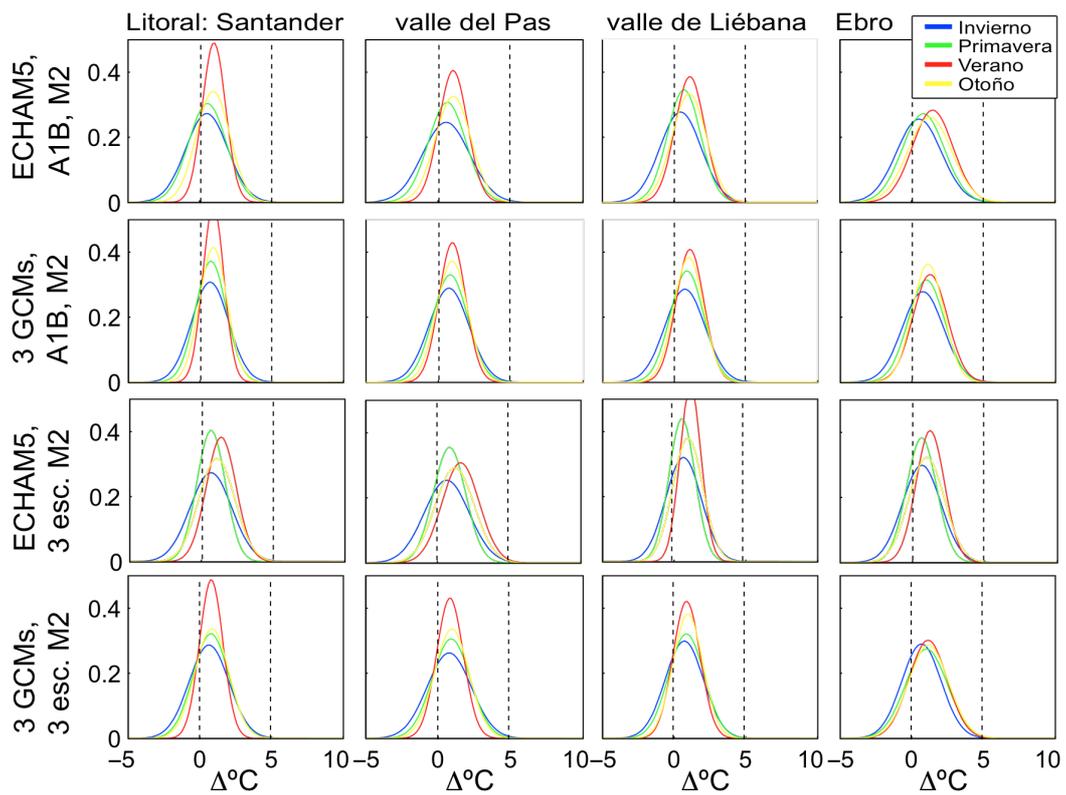


Figura 7.12: Funciones de probabilidad del incremento de la temperatura media ($^{\circ}\text{C}$) dada por las proyecciones regionales estadísticas (diferencia entre los valores del período 2011-40 y el control) en cuatro grandes zonas climáticas de Cantabria: Litoral, Pas, Ebro y Liébana. Los distintos colores indican las cuatro estaciones del año. Las funciones de probabilidad se han obtenido ajustando una distribución gaussiana a los valores estacionales individuales del período de control.

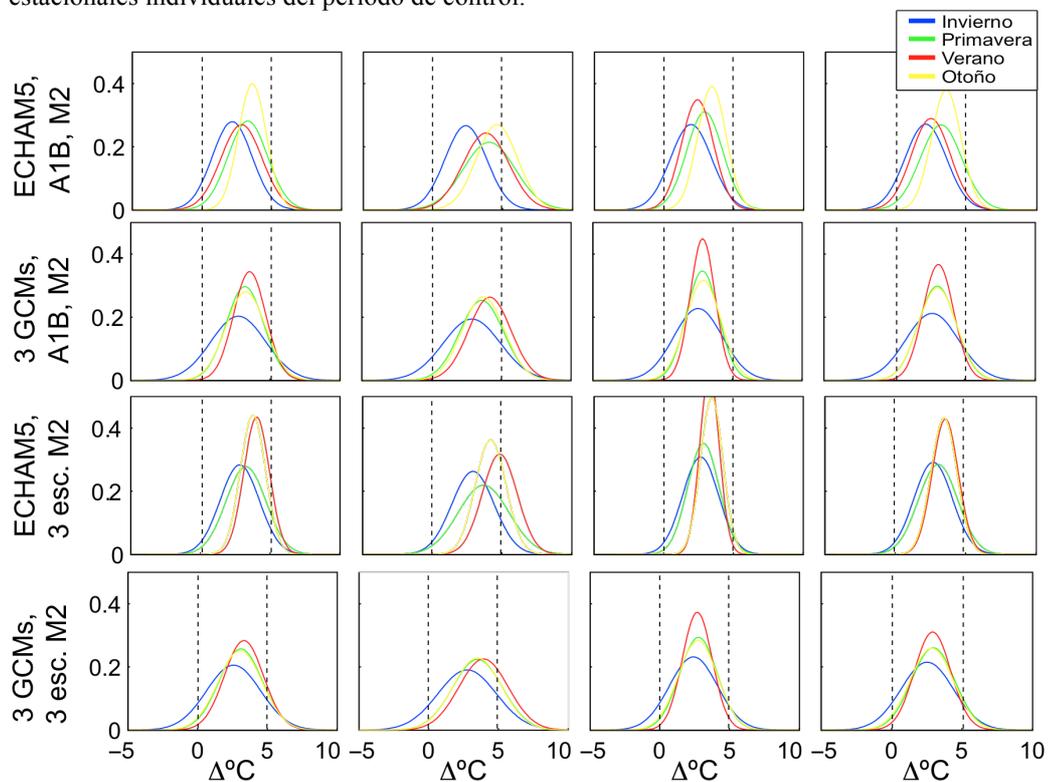


Figura 7.13: Como la Figura 7.12, pero para las diferencias entre los valores del período 2071-2100 y el control).

7.6. Proyecciones Regionales de Alta Resolución (1 km) para Cantabria

Como resultado final del proyecto, junto con los resultados de las validaciones y comparaciones realizadas en las secciones anteriores, así como de la cuantificación de las distintas componentes de la incertidumbre, se proporcionan los escenarios regionales de cambio climático para temperaturas mínima y máxima y para precipitación en tres períodos futuros 2011-40, 2041-70 y 2071-2100, considerando tres modelos globales (BCM, CRNM, ECHAM5), tres escenarios (B1, A1B y A2) y un método estadístico de regionalización⁶. Los resultados de estas proyecciones, junto con la incertidumbre asociada (escenario + modelo global) se muestran en detalle en los mapas incluidos en el Anexo de esta memoria, tanto a escala anual, como estacional. Para dar una idea de la variación proyectada del clima en los distintos escenarios para los tres períodos futuros mencionados, así como de los incrementos correspondientes respecto al período de control las Figuras 7.14 a 7.16 muestran la media del multi-modelo en cada uno de los casos (esta información debe utilizarse siempre conjuntamente con la estimación de la incertidumbre que se proporciona en los mapas del Anexo).

Cabe destacar que para finales de siglo los resultados apuntan a reducciones significativas de la precipitación, con valores que podrían llegar al 50% en algunos casos (como el valle de Liébana).

7.7. Clasificación Climática en los Escenarios Futuros

Una vez que se dispone de las proyecciones para el siglo XXI de los valores diarios de temperatura y precipitación sobre una rejilla de 1km en Cantabria bajo distintos escenarios de emisión, es posible calcular la nueva redistribución de climas en la región de forma similar a como se muestra en la Figura 2.1 para el clima presente (período 1973-2003). En particular, la Figura 7.17 muestra la clasificación climática dada por el *ensemble* de modelos utilizados en este trabajo en un escenario de control (clima presente) y un escenario futuro (finales de siglo). Obsérvese que la primera figura es comparable a la obtenida a partir de las observaciones, mostrada en la Fig. 2.1, indicando que la metodología de regionalización empleada en este proyecto reproduce de forma adecuada los distintos climas observados en Cantabria a partir de los modelos globales del clima.

La clasificación climática mostrada para finales de siglo con el escenario A1B indica una clara tendencia hacia un clima de tipo mediterráneo (Csa), sobre todo en el Oriente de la región, valle de Liébana y Ebro, y climas de transición mediterráneo-oceánico (Csb) que desplazan del litoral al clima Atlántico actual.

⁶ Obsérvese que uno de los objetivos del presente proyecto era proporcionar series diarias de las variables analizadas proyectadas para el siglo XXI, de forma que pudiesen ser utilizadas de forma óptima en los estudios de impacto. Por tanto, tras comprobar que la técnica estadística de regionalización era el componente que aportaba menor incertidumbre a las proyecciones (frente a los escenarios y los modelos globales) se decidió generar las proyecciones considerando la técnica de regionalización que hubiese obtenido resultados óptimos en las validaciones y comparaciones realizadas.

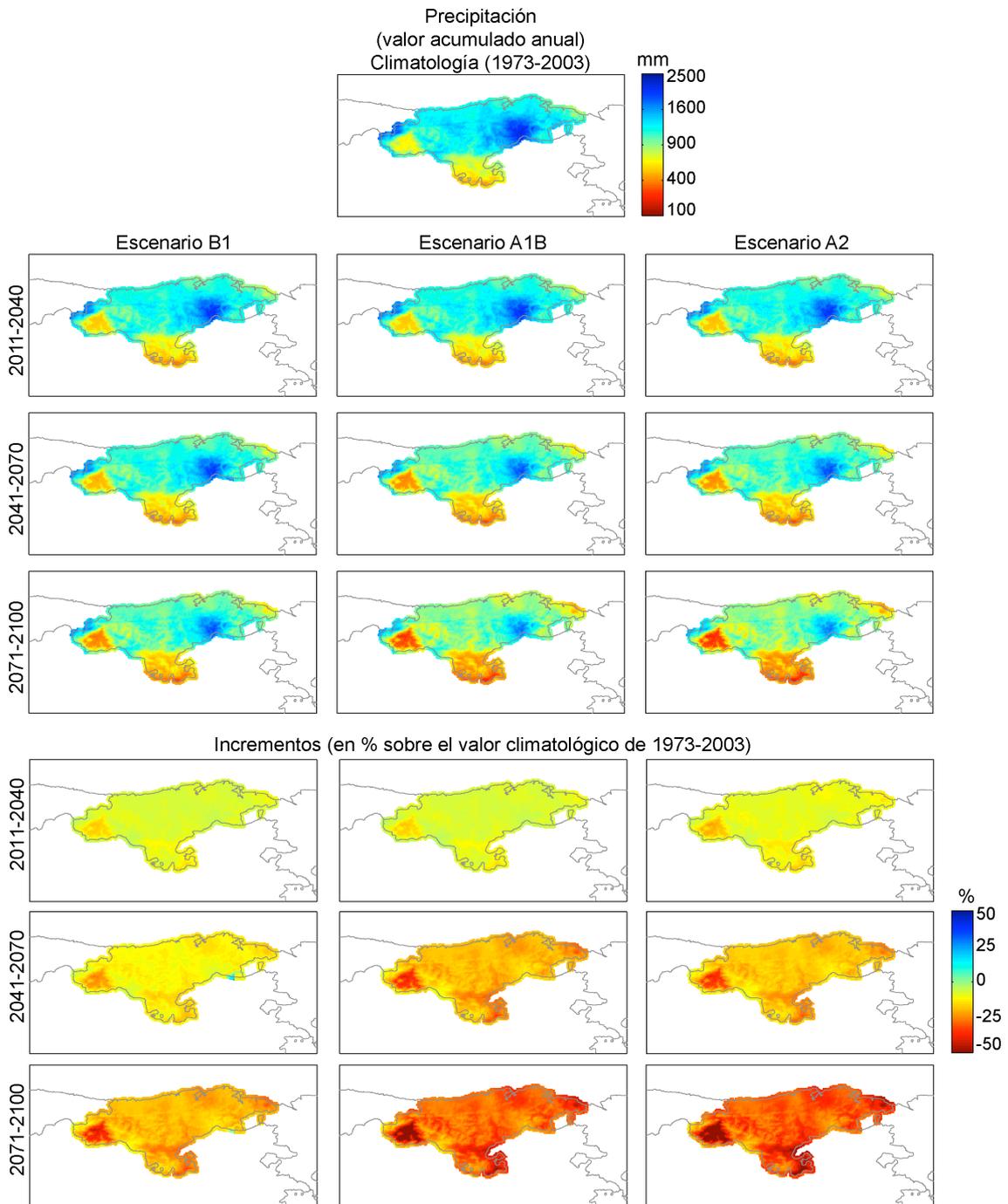


Figura 7.14. Proyecciones regionales (1 km) de precipitación en Cantabria para distintos modelos globales (BCM, CNRM y ECHAM5) y escenarios (B1, A1B y A2, en columnas) para los períodos 2011-40, 2041-70, 2071-2100 (en filas). La figura superior muestra la climatología del período de referencia (1973-2003); el segundo bloque de figuras muestra las climatologías futuras proyectadas y el tercer bloque los incrementos relativos correspondientes.

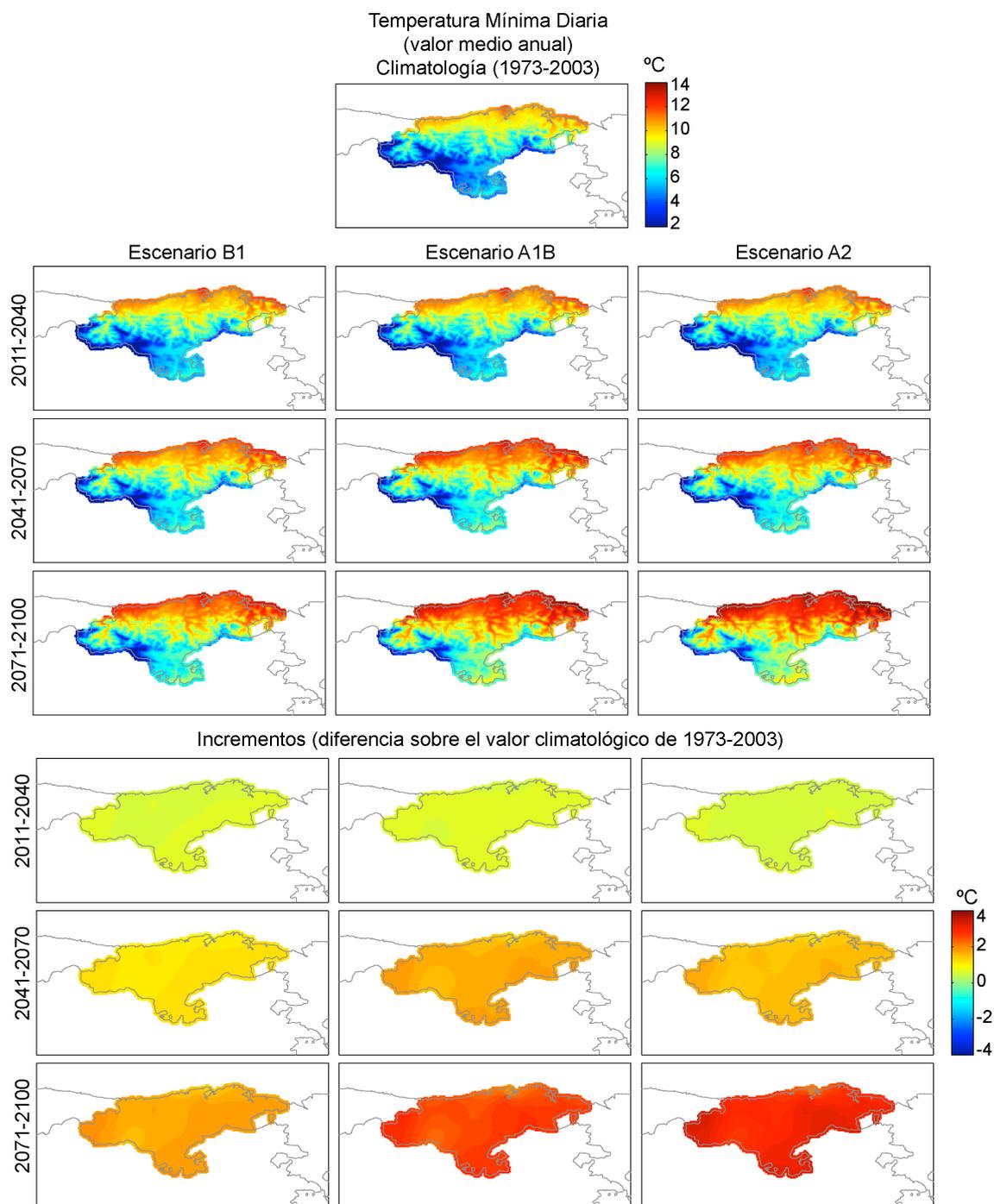


Figura 7.15. Como la Figura 7.14 pero para temperatura mínima.

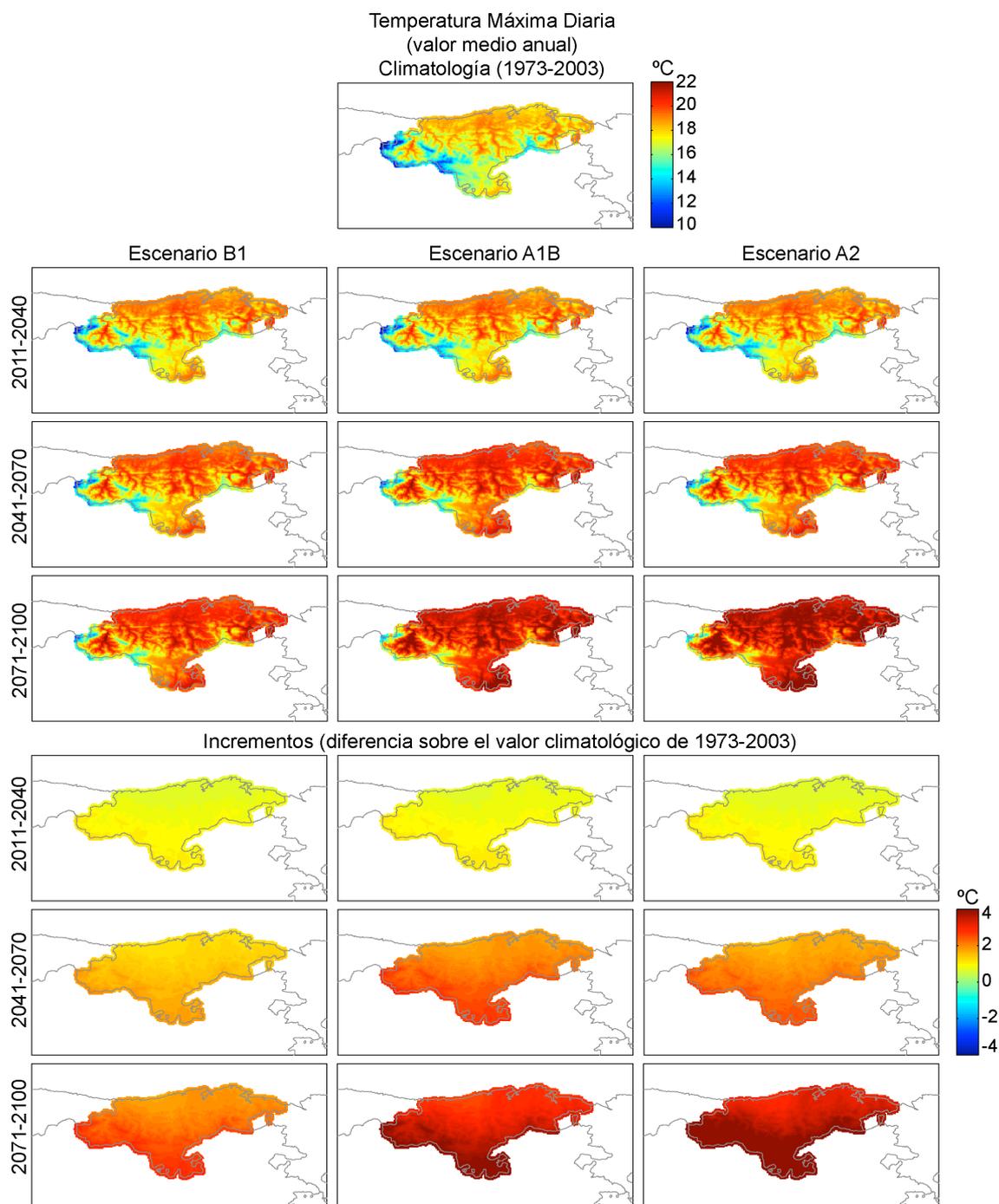


Figura 7.16. Como la Figura 7.14 pero para temperatura máxima.

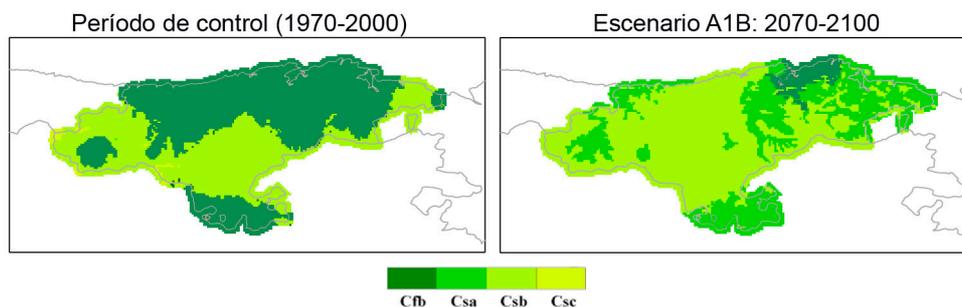


Fig. 7.17: (izquierda) Clasificación climática de Cantabria, obtenida a partir de las proyecciones en la rejilla de 1km de los datos de un período de control (escenario 20c3m) de los tres modelos globales del clima (GCMs) usados en este trabajo. (derecha) clasificación climática correspondiente a los mismos modelos pero en el período 2070-2100 para el escenario A1B.

Conclusiones

En esta sección se presentan las conclusiones más importantes del trabajo, así como las posibles actuaciones futuras de cara al mantenimiento y mejora de los productos elaborados. Las conclusiones se han agrupado por temas:

MAPAS DE CLIMA DE ALTA RESOLUCIÓN: En este proyecto se han generado mapas del clima en Cantabria a 1 km de resolución, estimando tanto los valores de la rejilla a partir de las observaciones, como la incertidumbre asociada al método de interpolación y la irregular densidad y variabilidad de los datos. Este análisis pone de manifiesto la existencia de zonas que obtendrían una gran mejora si se dispusiese de observaciones (sobre todo zonas de montaña, como Picos de Europa). Por tanto, para mejorar los resultados obtenidos podría ser interesante incorporar nuevos datos de precipitación y temperatura mediante la instalación de totalizadores y registros en diferentes partes de la región, haciendo especial énfasis en las zonas montañosas (Peña Sagra, Tresmares, Bistruey, Peña Prieta, etc.), en las cuales se pueden definir transectos que den muestra de los gradientes y de los fenómenos que allí ocurren a lo largo de todo el año, como son las fuertes inversiones de temperatura ocurridas en invierno y las no menos importantes ocurridas en verano.

INCERTIDUMBRE: A lo largo de todo el trabajo se ha hecho especial énfasis en la necesidad de cuantificar las distintas fuentes de incertidumbre existentes para tener una información completa del problema del cambio climático. Se ha cuantificado tanto la incertidumbre de los mapas de la climatología presente (período de referencia 1973-2003), como la incertidumbre de la variación futura del clima proyectada tanto con los modelos globales (GCMs) como con los modelos regionales (RCMs y métodos estadísticos). Así, para los escenarios regionales desarrollados en este proyecto se ha estimado la incertidumbre tanto en los distintos escenarios socio-económicos de emisión (B1, A1B y A2), como en los modelos globales (se han considerado tres modelos: ECHAM5, CNRM y BCM2) y en las técnicas de regionalización, tanto dinámicas, como estadísticas. Por tanto, todos los mapas de resultados finales se acompañan de un mapa asociado de incertidumbre (dada por la desviación estándar del conjunto de resultados posibles), para poder comparar de forma apropiada la razón señal/incertidumbre.

ESCENARIOS DE EMISIÓN: Los distintos escenarios de emisión afectan a la intensidad de los cambios pero no a su distribución espacial. Como es de esperar, se obtiene un mayor aumento de la temperatura con el escenario A2 y cambios más suaves en el B1. Los descensos de precipitación también son más acusados en el escenario A2.

REGIONALIZACIÓN DINÁMICA: Se han analizado las simulaciones regionales multi-modelo más avanzadas hasta la fecha, compuestas por las simulaciones de 10 RCMs con una resolución de 25 km. En este trabajo se ha puesto de manifiesto que es necesario descartar aquellos modelos de peor comportamiento para tener resultados homogéneos, donde la incertidumbre (dispersión) no aumente innecesariamente. Los modelos seleccionados son KNMI, HC, MPI, ETHZ y UCLM y conforman un bloque homogéneo que captura la tendencia decreciente de la precipitación sobre Cantabria.

Sin embargo, la resolución de los modelos dinámicos (25 km) no permite resolver las distintas climatologías existentes en las zonas Central, valle de Liébana y Ebro, aunque sí es capaz de diferenciar el clima suavizado del Litoral. La simulación llevada a cabo con el modelo regional WRF muestra que considerando una resolución de 5 km se podrían reproducir adecuadamente las características regionales de las zonas antes mencionadas.

REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA: Estas técnicas han permitido obtener escenarios regionalizados a mayor resolución (1 km) utilizando la rejilla de observaciones interpoladas desarrollada en el proyecto. Los resultados permiten matizar cambios regionales que escapaban tanto a los modelos globales, como a los regionales dinámicos. La flexibilidad de estas técnicas,

unido a sus moderados requerimientos computacionales han permitido hacer un experimento exhaustivo, explorando un amplio conjunto de técnicas estadísticas y aplicándolas sobre todos los GCMs disponibles. Se han validado las distintas técnicas teniendo en cuenta tanto su bondad de ajuste en condiciones perfectas (con datos de reanálisis) como su robustez para proyectar el clima futuro a partir de las simulaciones de los GCMs. A partir de este análisis se ha establecido que un tipo de metodología (análogos) no es apropiado para proyectar los escenarios globales de temperatura. Este tipo de estudios de robustez no suelen realizarse en proyectos similares, por lo que aportan un valor añadido a este trabajo.

TEMPERATURAS: Las temperaturas aumentarán una media de tres grados al final del siglo (4 ± 2 °C para el peor escenario, A2). Si se consideran las cuatro grandes zonas climáticas de Cantabria (litoral, centro, Ebro y Liébana) se puede concluir que el incremento de temperaturas será más suave en el litoral y centro que en el Ebro y Liébana, con diferencias de entre 1 y 2 °C grados a finales de siglo entre estas zonas. Este gradiente es más acusado en verano, donde los incrementos respecto del litoral pueden alcanzar temperaturas hasta de 4 °C en el Ebro. En el caso de las temperaturas mínimas, los aumentos son más uniformes en toda la región.

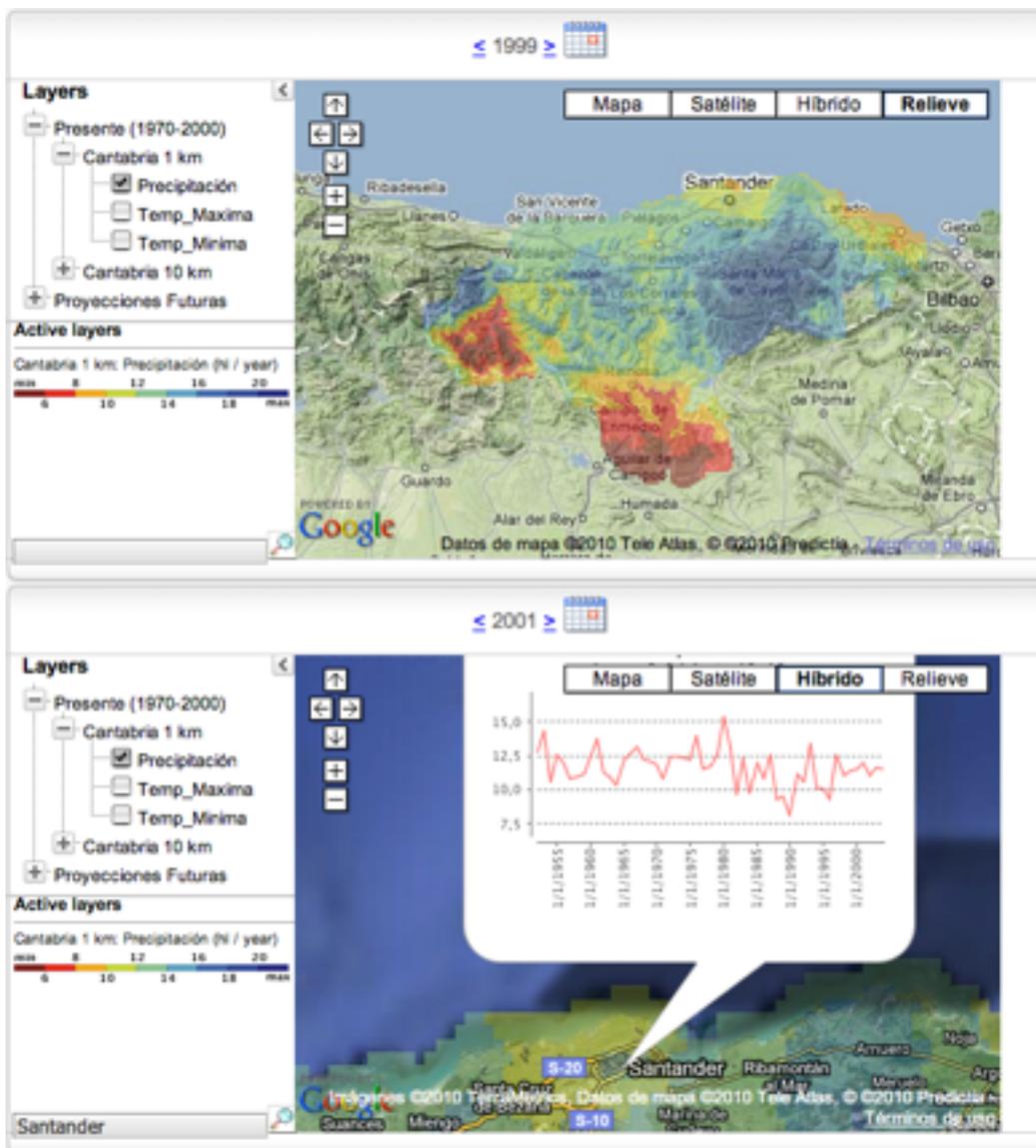
PRECIPITACIÓN: Se confirma una disminución de precipitación en toda la región en en la segunda mitad del siglo (en la primera mitad la incertidumbre es mayor que la propia señal). Los cambios podrán llegar a descensos del 20% en la región con máximos de hasta del 40% en el valle de Liébana. Además, el patrón de cambio en la precipitación varía estacionalmente, mientras que al aumentar el horizonte de proyección únicamente cambia de intensidad. Las mayores disminuciones de precipitación se dan en primavera y otoño. En invierno, la disminución de precipitación es menos acusada y más uniforme en toda la región. Como es de esperar, la incertidumbre aumenta con el horizonte de proyección de los escenarios. La mayor incertidumbre se da en verano, aunque esto es esperable ya que es la época de menor precipitación y pequeñas variaciones absolutas dan lugar a grandes cambios en la precipitación relativa.

CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA: La clasificación climática obtenida para finales de siglo a partir de las proyecciones regionales con los escenarios A1B y A2 indican una clara tendencia hacia un clima de tipo mediterráneo (Csa), sobre todo en el Oriente de la región, valle de Liébana y Ebro, y climas de transición mediterráneo-oceánico (Csb) que van desplazando progresivamente del litoral al clima Atlántico actual.

Distribución de Datos: NetCDF, Soporte SIG y Portal Web

La información producida en este trabajo relativa a la climatología de Cantabria en el período 1973-2003 para la rejilla de 1 km a escala diaria (Capítulo 4), así como las proyecciones futuras en esta rejilla para el período 2010-2100 con los distintos escenarios, modelos y técnicas de downscaling (18 realizaciones en total), también a escala diaria, se ha almacenado en formato NetCDF⁷ y están disponibles en <http://www.meteo.unican.es/escenariosCantabria>.

En este portal también se encuentra una herramienta de visualización via Web, desarrollada por la empresa Predictia S.L. (<http://www.predictia.es>) para este proyecto, basada en *iMeteo*, que permite superponer distintas capas de información en *googlemaps*. En este caso, la visualización se limita a los datos agregados anuales, para los períodos arriba indicados (en el caso de las proyecciones futuras se muestra la medida de las 18 realizaciones disponibles). Las siguientes figuras muestran el uso de esta herramienta para visualizar espacialmente o temporalmente los datos.



⁷ NetCDF es un formato estándar para almacenar datos meteorológicos, y se dispone de herramientas eficientes para su acceso y visualización (<http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf-java/>), así como para importar estos datos desde múltiples paquetes (Matlab, R, etc.). Una información detallada de este formato se tiene en <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>

Por otra parte, la información anual y estacional se ha incorporado a un Sistema de Información Geográfica sobre un formato electrónico en soporte GeoDataBase ArcGIS (también en formato compatible con versiones anteriores de ESRI, Inc.), de manera que se pueda integrar la información con otras bases de datos y cartotecas disponibles. De esta manera, se han obtenido capas (mapas) para cada uno de los parámetros climáticos básicos: temperaturas máxima y mínima y precipitación. También se han generado mapas en formatos de libre distribución (PDF), para que puedan ser consultados e impresos de forma más flexible por otros usuarios (estudios de impactos, etc.). Un ejemplo de la información elaborada lo ilustra la Figura 4.17, que es un fichero PDF correspondiente a la climatología de precipitación anual acumulada. Como se puede ver, dentro del mapa grande que indica el valor de precipitación acumulada en los distintos puntos de la rejilla regular de 1km que cubre Cantabria se incluye otro mapa pequeño que muestra la incertidumbre asociada a esta información (en este caso la debida al método de interpolación utilizado para producir la rejilla, en el caso de proyecciones futuras la incertidumbre de la variación).

Como Anexo a este documento se incluyen copias impresas de los mapas más relevantes de la cartoteca, que también están disponible, junto con otros mapas no impresos, en un CD con un visor GIS auto-instalable. Para esta tarea se subcontrató a la empresa SIGRURAL S.L. (<http://www.sigrural.es>), que colabora asiduamente con el Gobierno de Cantabria en los desarrollos SIG de otros proyectos, como el Proyecto de Zonificación Agro-Ecológica.

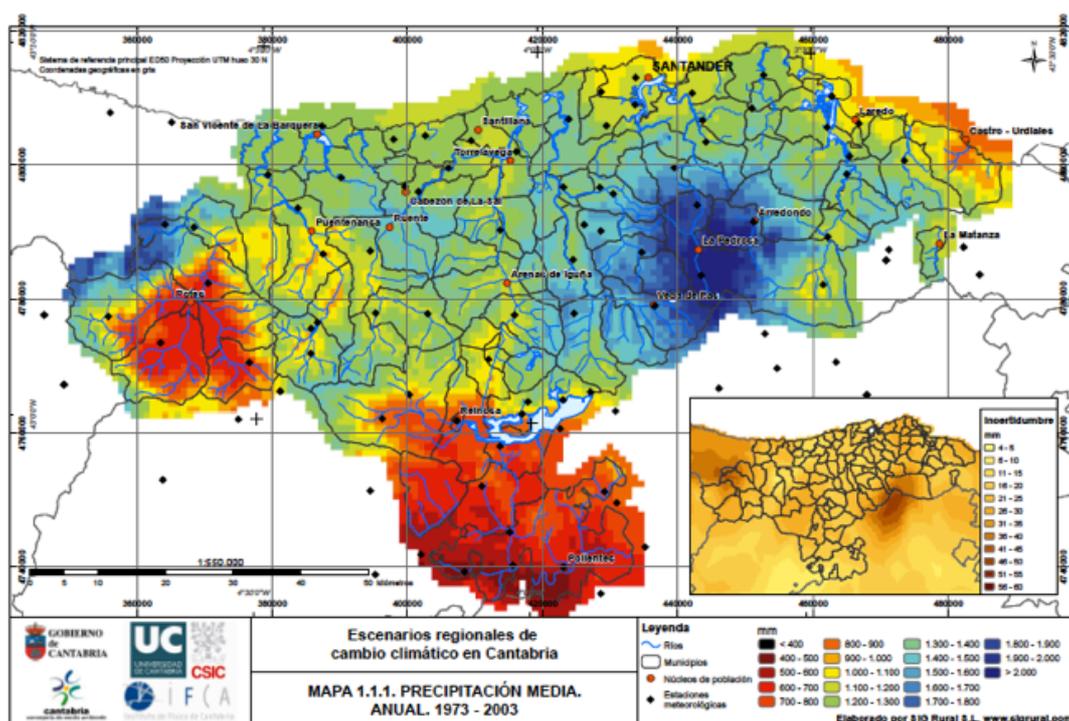


Figura 4.18: Ejemplo de mapa final (en formato PDF) que forma parte de la cartoteca del proyecto (en este caso precipitación acumulada anual, junto con la incertidumbre).

Referencias

- Alexandersson, H. (1986) A homogeneity test applied to precipitation data. *J. Climatol.*, 6, 661-675.
- Alexandersson and Moberg (1997), Homogenization of Swedish Temperature Data. Part I: Homogeneity Test for Linear Trends, *Int. J. Climatol.*, 17, 25-34.
- Atkinson, M. and Lloyd, C.D. (1998) Mapping precipitation in Switzerland with ordinary and indicator kriging. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 2, 65-76.
- Biau, G. (1999), Estimation of Precipitation by Kriging in the EOF Space of the Sea Level Pressure Field. *Journal of Climate*, 12, 1070-1085.
- Benestad, R. et al. (2008) *Empirical-Statistical Downscaling*, World Scientific Publishers. <http://www.gvc2.gu.se/ngeo/rcg/edu/esd.pdf>
- Cano, R. (1999) *Atlas Climático de la Región Cantábrica*. Instituto Nacional de Meteorología, Nota Técnica CMT/CAS.
- Collins, M. (2007) "Ensembles and probabilities: A new era in the prediction of climate change". *Phil. Trans. R. Soc. A*, 365, doi:10.1098/rsta.2007.2068.
- Conrad, V. and Pollack, L.D. (1962) *Methods in Climatology*, Harvard University Press.
- Easterling, C, Peterson, T, Karl, T. (1996) On the development and use of homogenized climate datasets. *Journal of Climate*, 9, 1429-1434.
- Fernández, J, Montávez, J.P., Sáenz, J., González-Rouco, J.F. and Zorita, E. (2007) Sensitivity of MM5 Mesoscale Model to Physical Parameterizations for Regional Climate Studies: Annual Cycle. *Journal of Geophysical Research*, 112, 4101.
- Giorgi, F. and L.O. Mearns, 1999: Regional climate modelling revisited: an introduction to the special issue. *Journal of Geophysical Research*, 104(D6), 6335-6352.
- Giorgi, F. and R. Francisco, 2000: Uncertainties in regional climate change prediction: a regional analysis of ensemble simulations with HadCM2 coupled AOGCM. *Climate Dynamics*, 16, 169-182.
- Goodess, C.M., Jacob, D., Déqué, M., Gutiérrez, J.M., Huth, R., Kendon, E., Leckebusch, G., Lorenz, P. and Pavan, V. (2009) Downscaling methods, data and tools for input to impact assessment. In van der Linden and Mitchell (eds.) "ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project", Cap. 6.
- Guijarro, J.A. (2004) *Climatol: Software libre para la depuración y homogeneización de datos climatológicos* En García Codrón, J.C. et al. (Eds.) *El Clima entre el Mar y la Montaña*. Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria, Serie A nº 4, Santander.
- Gutiérrez, J.M., Cano, R., Cofiño, A.S. and C. Sordo, 2004: *Redes probabilísticas y neuronales en las ciencias atmosféricas*. Monografías del Instituto Nacional de Meteorología, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

- Gutiérrez, J.M. y Pons, M.R. (2006) “Modelización numérica del cambio climático: Bases científicas, incertidumbre y proyecciones para la Península Ibérica”. *Revista de Cuaternario y Geomorfología* 20, 15-28, 2006.
- Gutiérrez, J.M., Herrera, S., Frochoso, M. and Rodríguez, J.J. (2008) Caracterización Climática de la Península de la Magdalena. En *"Estudio del Medio Físico para el Plan Director de la Península de la Magdalena (Santander)"*, 29-46, Sáinz, E and Díaz de Terán, J.R. editores. Ecmo. Ayuntamiento de Santander
- Haylock, M.R., Cawley, G.C., Harpham, C., Wilby, R.L. and Goodess, C.M., (2006), Downscaling Heavy Precipitation over the United Kingdom: A comparison of dynamical and statistical methods and their future scenarios”. *International Journal of Climatology*, 26 1397-1415
- Haylock, M.R., N. Hofstra, A.M.G. Klein-Tank, E. J. Klok, P.D. Jones and M. New (2008), A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950--2006, *Journal of Geophysical Research*, D20119, 113.
- Herrera, S., L. Fita, J. Fernandez, J.M. Gutiérrez (2009), Evaluation of the mean and extreme precipitation regimes in the ENSEMBLES RCM multi-model dataset over Spain. To be submitted to *Journal of Geophysical Research*.
- IPCC: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), edited by: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., and Miller, H. L., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2007.
- Khaliq, M.N. and Ouarda, T.B.M.J. (2007) On the critical values of the Standard Normal Homogeneity Test (SNHT). *International Journal of Climatology*, 27, 681-687.
- Kidson, J.W. and Thompson, C.S. (1998) “A comparison of statistical and model-based downscaling techniques for estimating local climate variations”, *Journal of Climate*, 11, 735-753.
- Leung, L.R., Mearns, L.O., Giorgi, F., and Wilby, R.L. (2003). “Regional Climate Research: Needs and Opportunities”. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84, 89-95.
- Mitchell, T.D. and M. Hulme (1999). "Predicting regional climate change: living with uncertainty". *Progress in Physical Geography* 23(1): 57-78.
- Murphy, J.M. (2000) “Predictions of climate change over Europe using statistical and dynamical downscaling techniques”. *International Journal of Climatology*, 20, 489-501.
- Murphy, J.M. et al. (2004) “Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations”. *Nature* 430, 768-772.
- Nakicenovic, N. et al. 2001 *"IPCC Special Report on Emissions Scenarios"*. Cambridge University press. 599 pp.
- Peixoto, J.P. and Oort, A.H. 1992 *"Physics of Climate"*. American Institute of Physics.

- Primo, C., Szendro, I., Rodríguez, M.A. and Gutiérrez, J.M. (2007) "Error Growth Analysis in Spatiotemporal Chaotic Systems: Coupled Map Lattices and Global Weather Models", *Physical Review Letters*, in press.
- Patz, J.A., Campbell-Lendrum, D., Holloway, T. And Foley, J.A. (2005) "Impact of regional climate change on human health", *Nature*, 438, 310-317.
- Pettitt A.N. (1979) A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Statist.*, 28(2), 126-135.
- Randall, D. A., Wood, R., Bony, S., Colman, R., Fichet, T., Fyfe, J., Kattsov, V., Pitman, A., Shukla, J., Srinivasan, J., Stouffer, R., Sumi, A., and Taylor, K. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, chapter Climate Models and their Evaluation*, pages 589–662. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.
- Sacks, Jerome. (1989), *Design and Analysis of Computer Experiments*, *Statistical Science*, 4, 409-423.
- Stott, P.A., Stone, D.A, Allen, M.R. (2004) "Human contribution to the European heatwave of 2003", *Nature* 432, 610-614.
- Stott, P.A., Tett, S.F.B., Jones, G.S., Allen, M.R., Ingram, W.J. and Mitchell, J.F.B. (2001) "Attribution of Twentieth Century Temperature Change to Natural and Anthropogenic Causes", *Climate Dynamics*, 20, 789-850.
- van der Linden P., and J.F.B. Mitchell (eds.) 2009: *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160pp.
- Vincent, L.A. (1998), A Technique for the Identification of Inhomogeneities in Canadian Temperature Series. *Journal of Climate*, 11, 1094-1104.
- Wilby, R.L., Charles, S.P., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P. and Mearns, L.O. (2004). "Guidelines for use of Climate Scenarios developed from Statistical Downscaling Methods". Supporting Material of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Yamamoto, J.K. (2000) An alternative measure of the reliability of ordinary kriging estimates, *Mathematical Geology*, 32, 489-509.

Anexo 1. Escenarios de Alta Resolución

En los siguientes mapas se muestran los principales resultados obtenidos en el proyecto, tanto en el desarrollo de la climatología presente como en las proyecciones de clima futuro, ambas en una rejilla de alta resolución (1 km) en Cantabria. En clima presente se muestra para cada variable las climatologías anuales y estacionales (invierno, primavera, verano y otoño). En el caso de las proyecciones, los resultados están divididos en tres periodos de 30 años: 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100. Para cada variable se muestran las variaciones proyectadas para cada periodo considerado. En el caso de las temperaturas estas variaciones son absolutas y por lo tanto se muestran en grados. En el caso de la precipitación, la variación está referida a la climatología observada y por lo tanto se expresa en porcentajes (%).

Cada uno de los mapas está compuesto por un mapa principal en el cual se muestra la variable indicada en el rótulo y un mapa secundario de tamaño inferior situado en la esquina inferior derecha que da cuenta de la incertidumbre asociada al mapa al que acompaña. En todos los casos, las unidades de ambos mapas son las mismas.

En el siguiente índice se muestran las referencias de los mapas y las variables que representan:

1. Precipitación

1.1 Clima Presente

- 1.1.1 Climatología Anual
- 1.1.2 Climatología de Invierno
- 1.1.3 Climatología de Primavera
- 1.1.4 Climatología de Verano
- 1.1.5 Climatología de Otoño

1.2 Proyecciones de Clima Futuro

- 1.2.1 Periodo 2010-2040: Climatología Anual
- 1.2.2 Periodo 2010-2040: Climatología de Invierno
- 1.2.3 Periodo 2010-2040: Climatología de Primavera
- 1.2.4 Periodo 2010-2040: Climatología de Verano
- 1.2.5 Periodo 2010-2040: Climatología de Otoño
- 1.2.6 Periodo 2040-2070: Climatología Anual
- 1.2.7 Periodo 2040-2070: Climatología de Invierno
- 1.2.8 Periodo 2040-2070: Climatología de Primavera
- 1.2.9 Periodo 2040-2070: Climatología de Verano
- 1.2.10 Periodo 2040-2070: Climatología de Otoño
- 1.2.11 Periodo 2070-2100: Climatología Anual
- 1.2.12 Periodo 2070-2100: Climatología de Invierno
- 1.2.13 Periodo 2070-2100: Climatología de Primavera
- 1.2.14 Periodo 2070-2100: Climatología de Verano
- 1.2.15 Periodo 2070-2100: Climatología de Otoño

2. Temperatura Máxima

2.1 Clima Presente

- 2.1.1 Climatología Anual
- 2.1.2 Climatología de Invierno
- 2.1.3 Climatología de Primavera
- 2.1.4 Climatología de Verano
- 2.1.5 Climatología de Otoño

2.2 Proyecciones de Clima Futuro

- 2.2.1 Periodo 2010-2040: Climatología Anual
- 2.2.2 Periodo 2010-2040: Climatología de Invierno
- 2.2.3 Periodo 2010-2040: Climatología de Primavera
- 2.2.4 Periodo 2010-2040: Climatología de Verano
- 2.2.5 Periodo 2010-2040: Climatología de Otoño
- 2.2.6 Periodo 2040-2070: Climatología Anual
- 2.2.7 Periodo 2040-2070: Climatología de Invierno
- 2.2.8 Periodo 2040-2070: Climatología de Primavera
- 2.2.9 Periodo 2040-2070: Climatología de Verano
- 2.2.10 Periodo 2040-2040: Climatología de Otoño
- 2.2.11 Periodo 2070-2100: Climatología Anual
- 2.2.12 Periodo 2070-2100: Climatología de Invierno
- 2.2.13 Periodo 2070-2100: Climatología de Primavera
- 2.2.14 Periodo 2070-2100: Climatología de Verano
- 2.2.15 Periodo 2070-2100: Climatología de Otoño

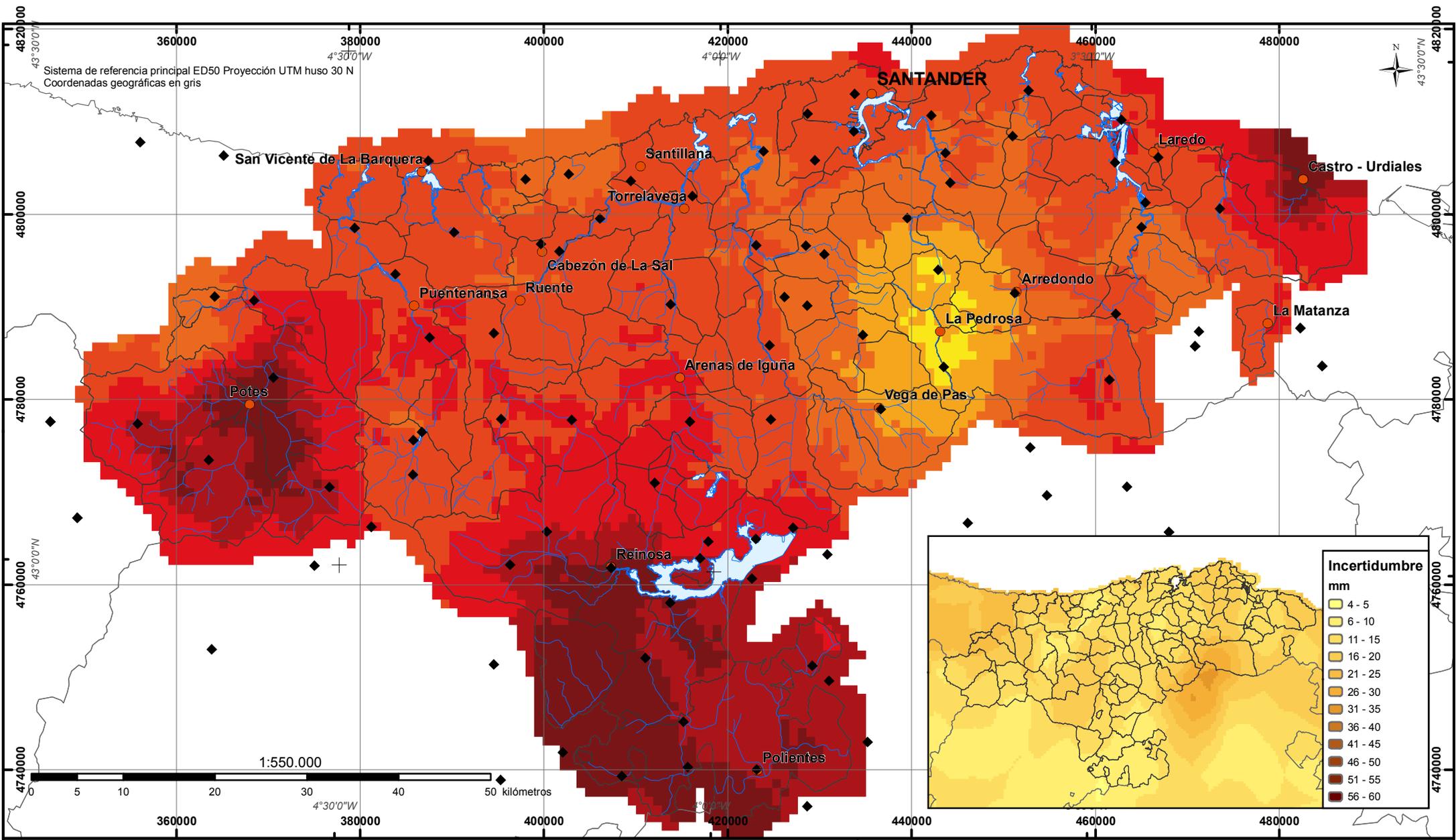
3. Temperatura Mínima

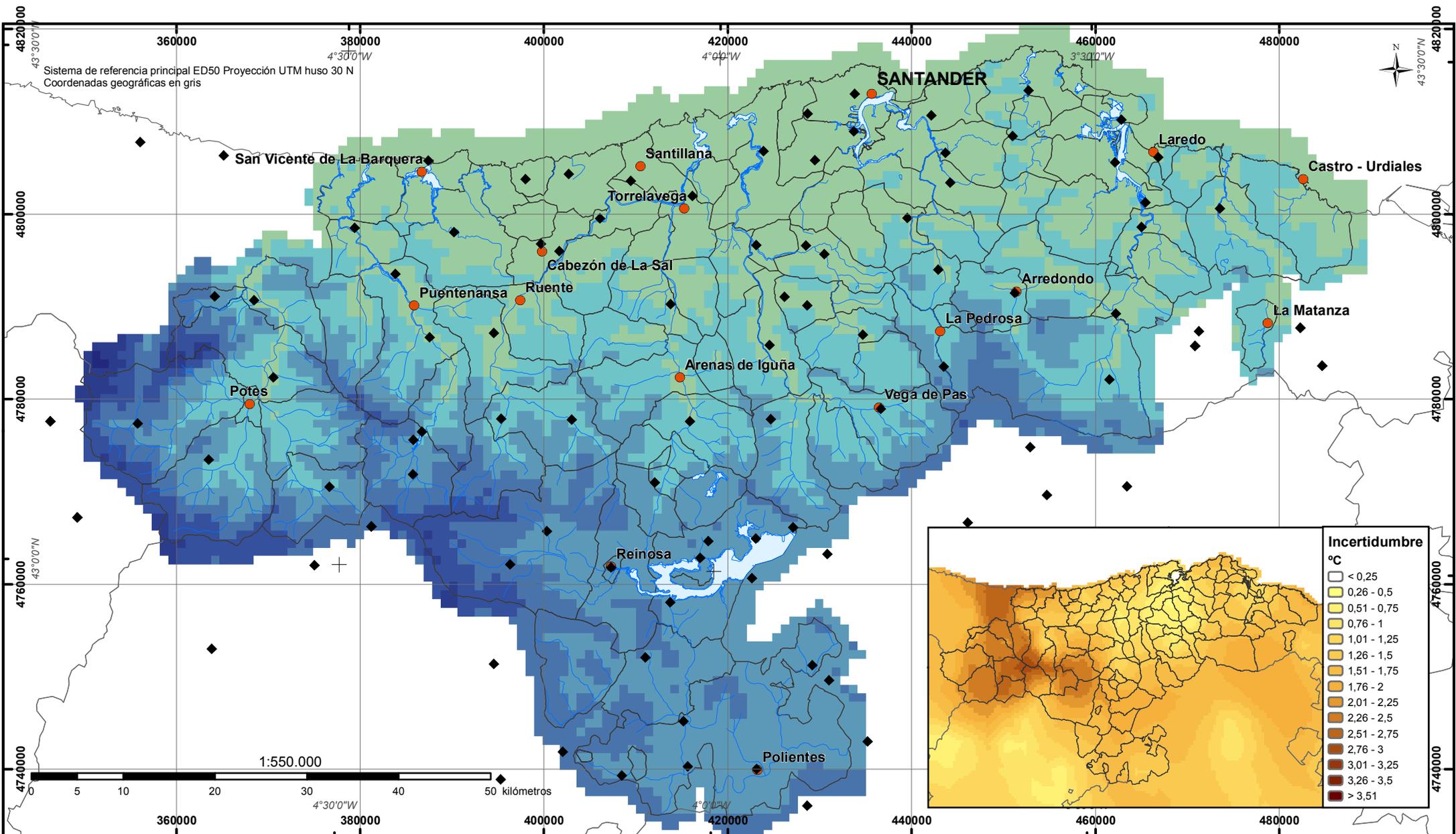
3.1 Clima Presente

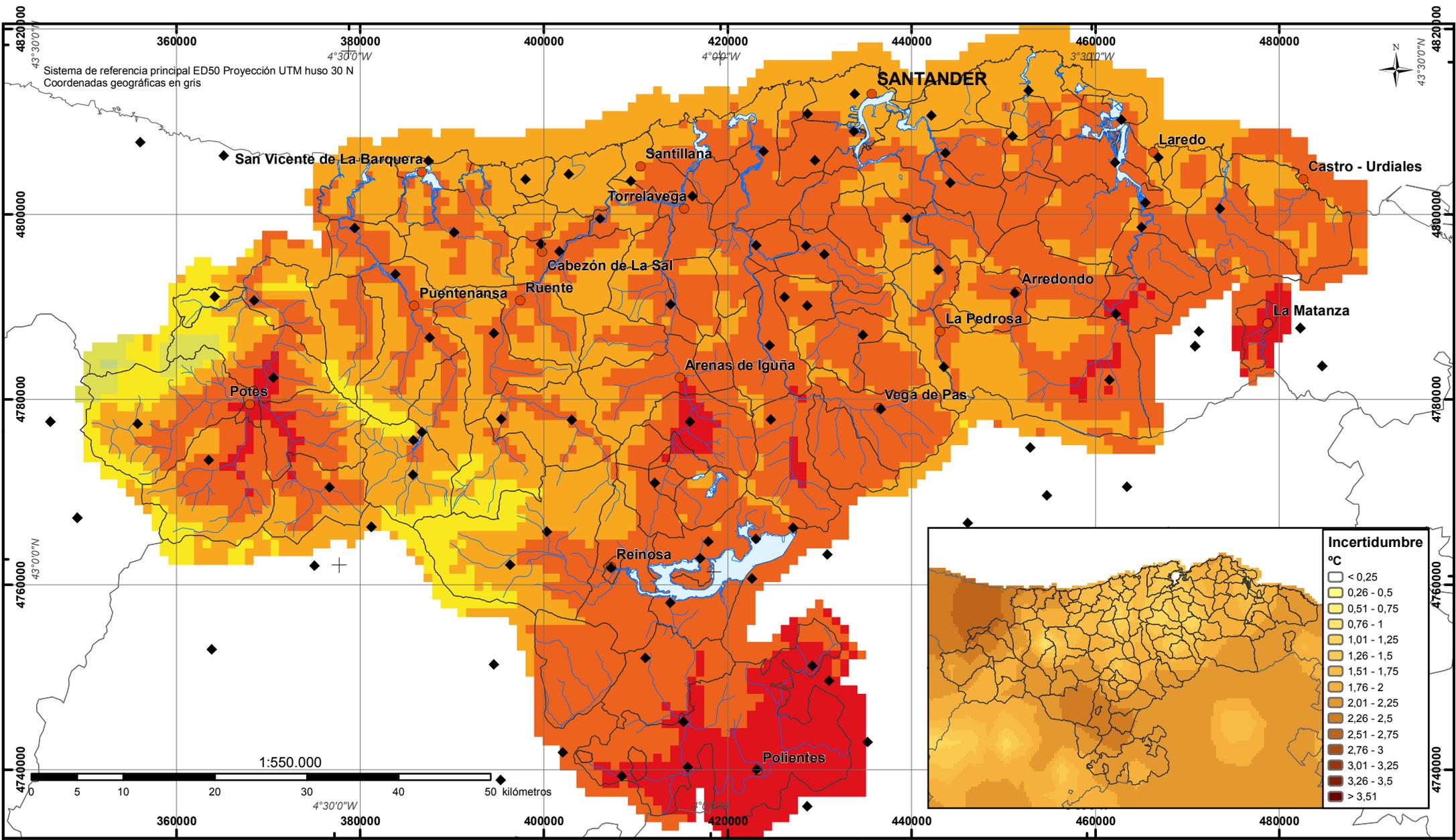
- 3.1.1 Climatología Anual
- 3.1.2 Climatología de Invierno
- 3.1.3 Climatología de Primavera
- 3.1.4 Climatología de Verano
- 3.1.5 Climatología de Otoño

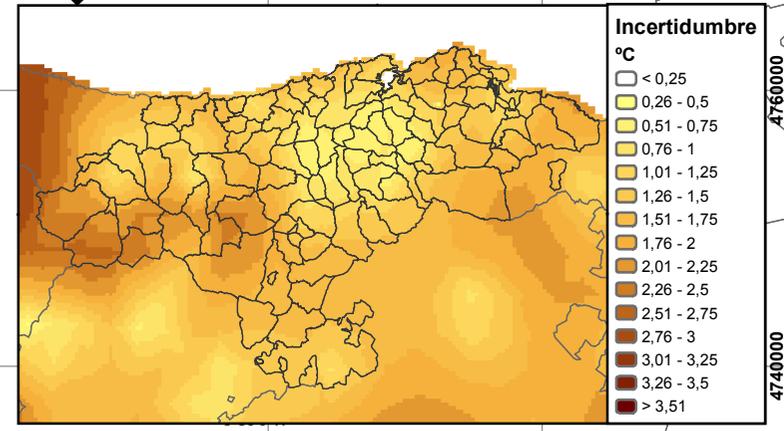
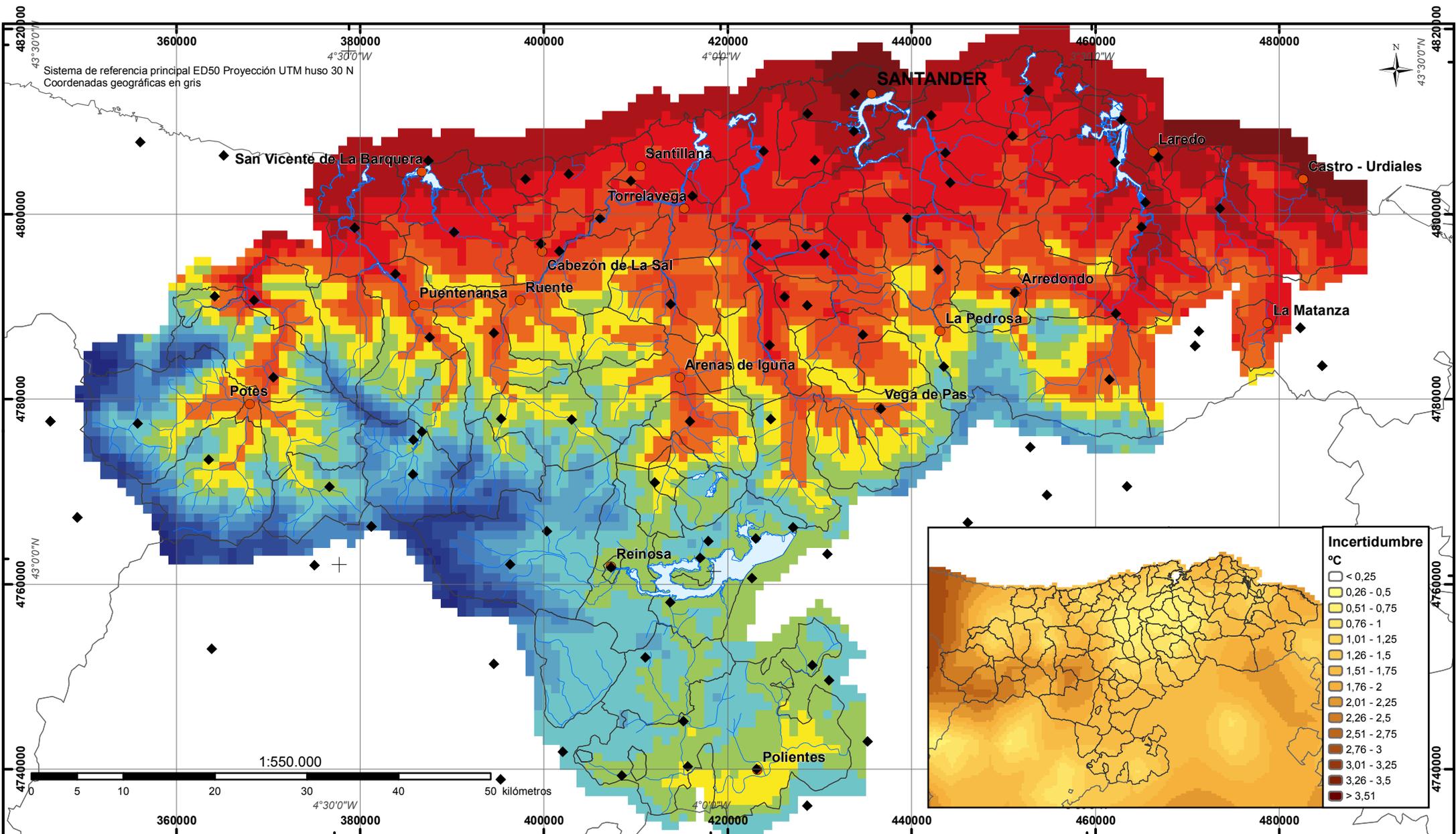
3.2 Proyecciones de Clima Futuro

- 3.2.1 Periodo 2010-2040: Climatología Anual
- 3.2.2 Periodo 2010-2040: Climatología de Invierno
- 3.2.3 Periodo 2010-2040: Climatología de Primavera
- 3.2.4 Periodo 2010-2040: Climatología de Verano
- 3.2.5 Periodo 2010-2040: Climatología de Otoño
- 3.2.6 Periodo 2040-2070: Climatología Anual
- 3.2.7 Periodo 2040-2070: Climatología de Invierno
- 3.2.8 Periodo 2040-2070: Climatología de Primavera
- 3.2.9 Periodo 2040-2070: Climatología de Verano
- 3.2.10 Periodo 2040-2040: Climatología de Otoño
- 3.2.11 Periodo 2070-2100: Climatología Anual
- 3.2.12 Periodo 2070-2100: Climatología de Invierno
- 3.2.13 Periodo 2070-2100: Climatología de Primavera
- 3.2.14 Periodo 2070-2100: Climatología de Verano
- 3.2.15 Periodo 2070-2100: Climatología de Otoño









Incertidumbre °C

< 0,25
0,26 - 0,5
0,51 - 0,75
0,76 - 1
1,01 - 1,25
1,26 - 1,5
1,51 - 1,75
1,76 - 2
2,01 - 2,25
2,26 - 2,5
2,51 - 2,75
2,76 - 3
3,01 - 3,25
3,26 - 3,5
> 3,51

Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria

MAPA 3.1.1. TEMPERATURA MÍNIMA MEDIA. ANUAL. 1973 - 2003

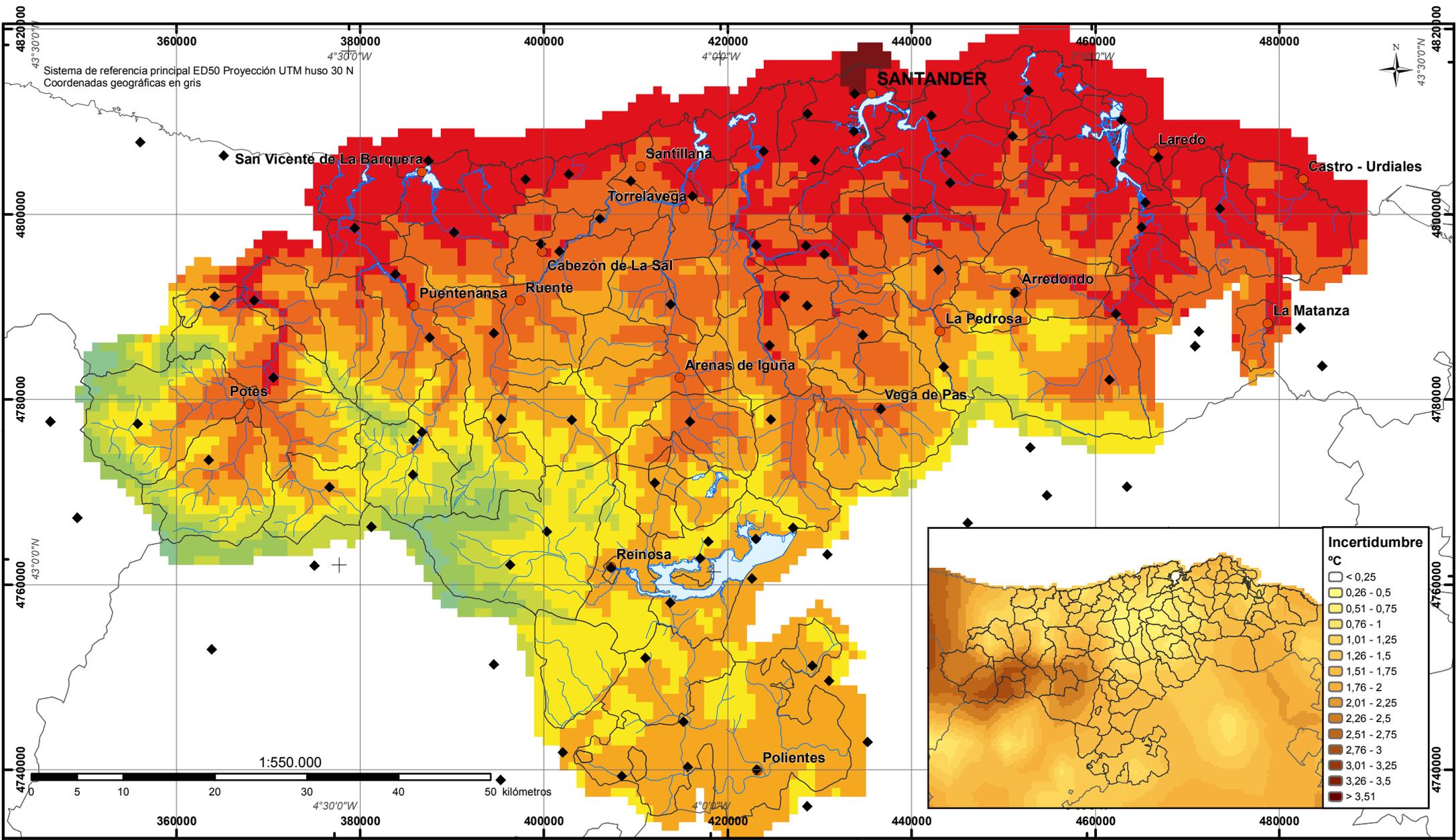
Leyenda

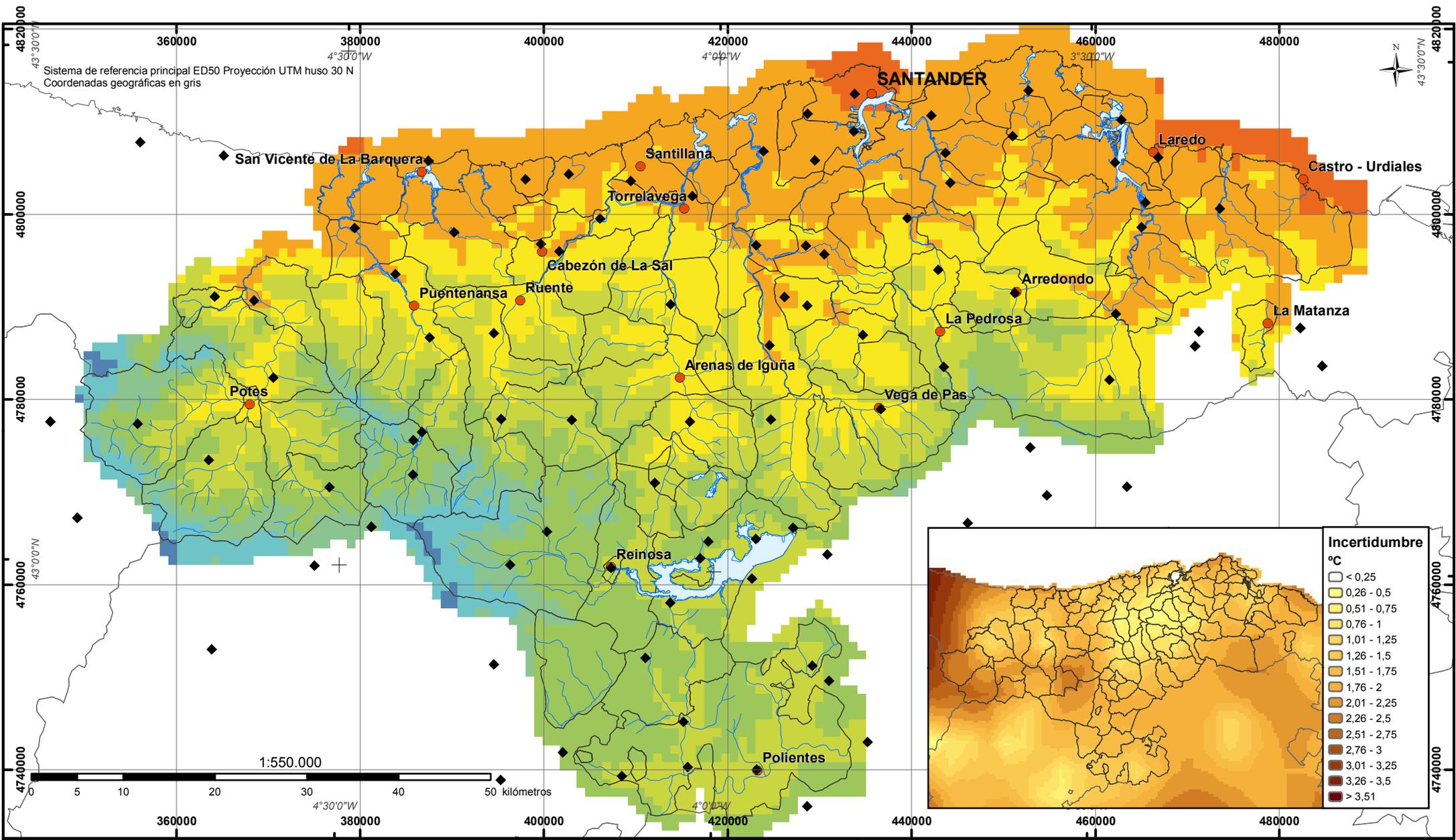
- Ríos
- Municipios
- Núcleos de población
- Estaciones meteorológicas

°C

< -1	2,1 - 3	6,1 - 7	10,1 - 11
-0,9 - 0	3,1 - 4	7,1 - 8	> 11
0,1 - 1	4,1 - 5	8,1 - 9	
1,1 - 2	5,1 - 6	9,1 - 10	

Elaborado por SIG Rural S.L. www.sigrural.com





Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria

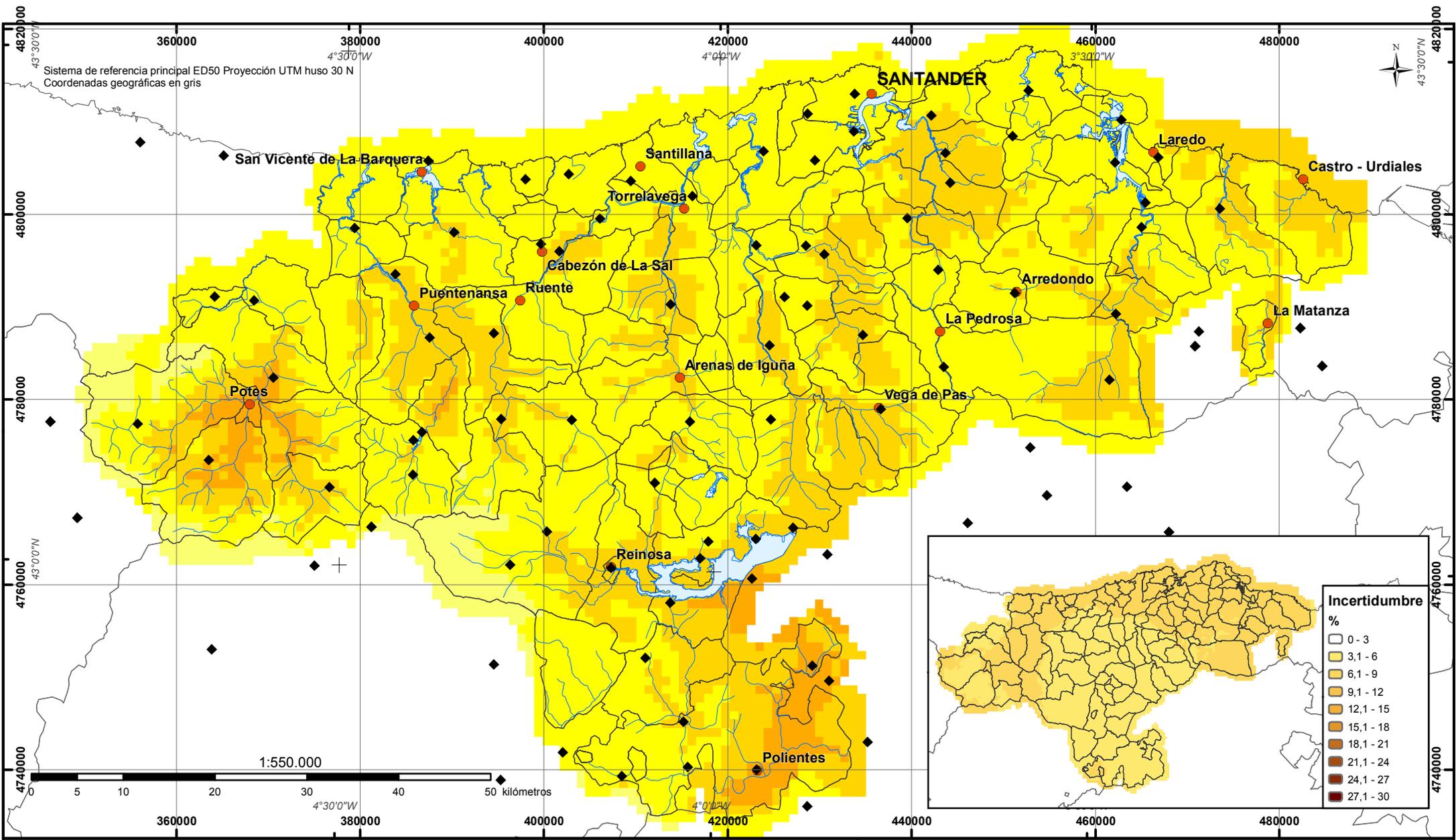
MAPA 3.1.5. TEMPERATURA MÍNIMA MEDIA. OTOÑO. 1973 - 2003

Leyenda

- Ríos
- Municipios
- Núcleos de población
- Estaciones meteorológicas

°C			
< -4	0,1 - 2	6,1 - 8	12,1 - 14
-3,9 - -2	2,1 - 4	8,1 - 10	14,1 - 16
-1,9 - 0	4,1 - 6	10,1 - 12	> 16

Elaborado por SIG Rural S.L. www.sigrural.com



UC
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

CSIC

GOBIERNO de CANTABRIA
CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE

IFA
Instituto de Física de Cantabria

Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria

MAPA 1.2.2. PRECIPITACIÓN MEDIA. INVIERNO. 2010 - 2040.

PORCENTAJE VARIACIÓN CON 1973-2003

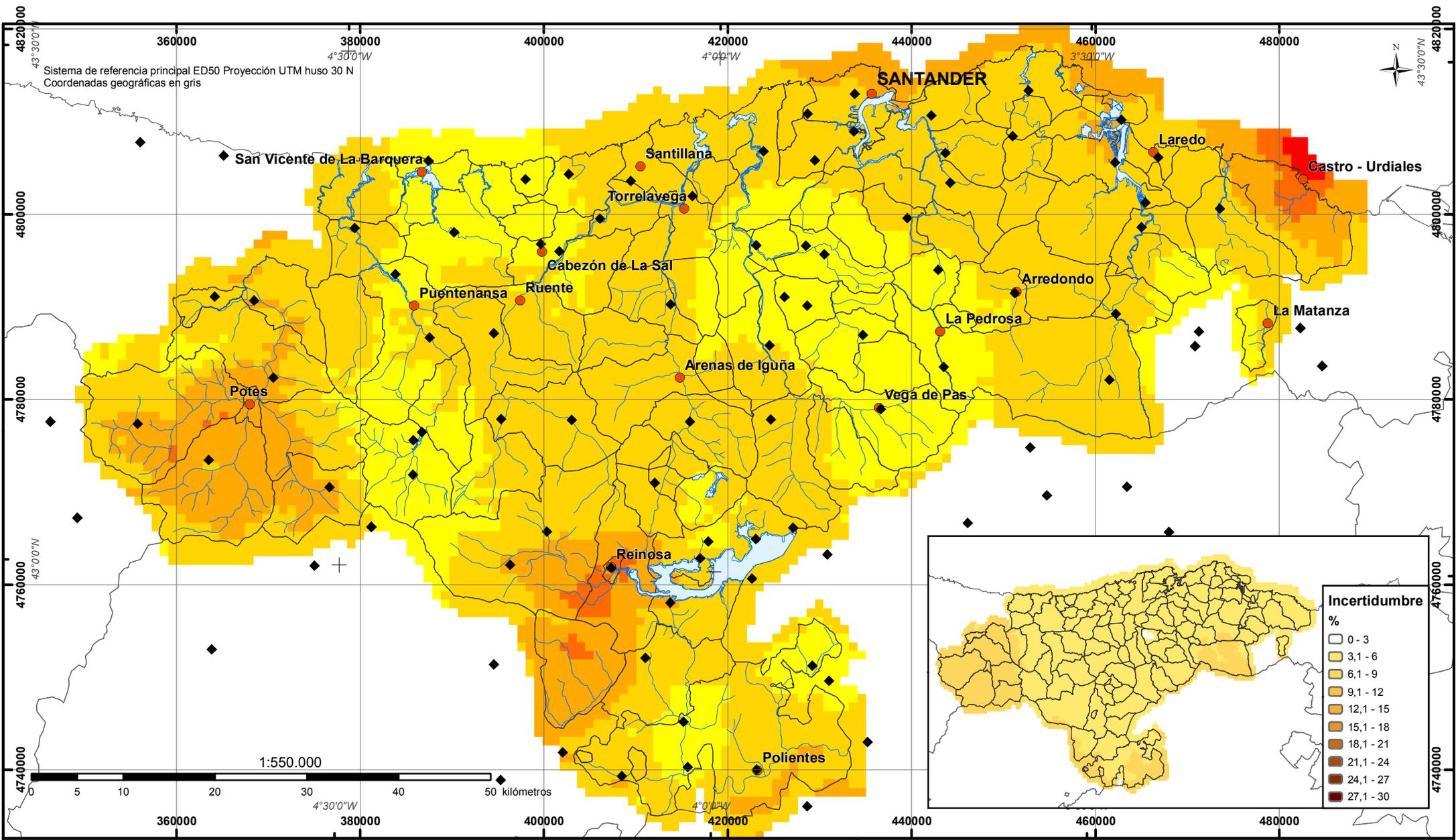
Leyenda

- Ríos
- Municipios
- Núcleos de población
- Estaciones meteorológicas

% variación

-45 - -40	-29 - -25	-14 - -10	1 - 5
-39 - -35	-24 - -20	-9 - -5	6 - 10
-34 - -30	-19 - -15	-4 - 0	11 - 15

Elaborado por SIG Rural S.L. www.sigrural.com



Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria

MAPA 1.2.4. PRECIPITACIÓN MEDIA. VERANO. 2010 - 2040.

PORCENTAJE VARIACIÓN CON 1973-2003

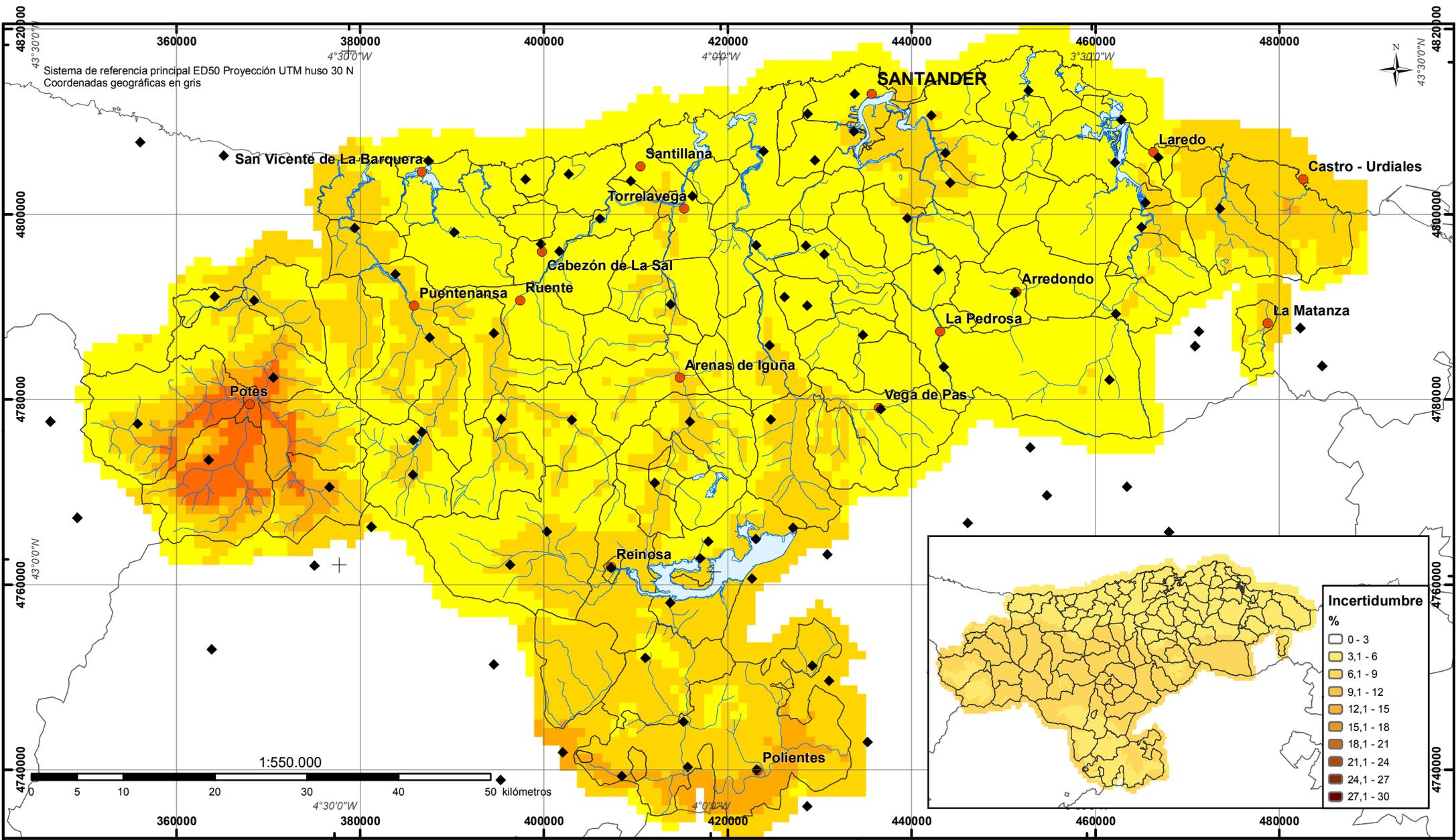
Legenda

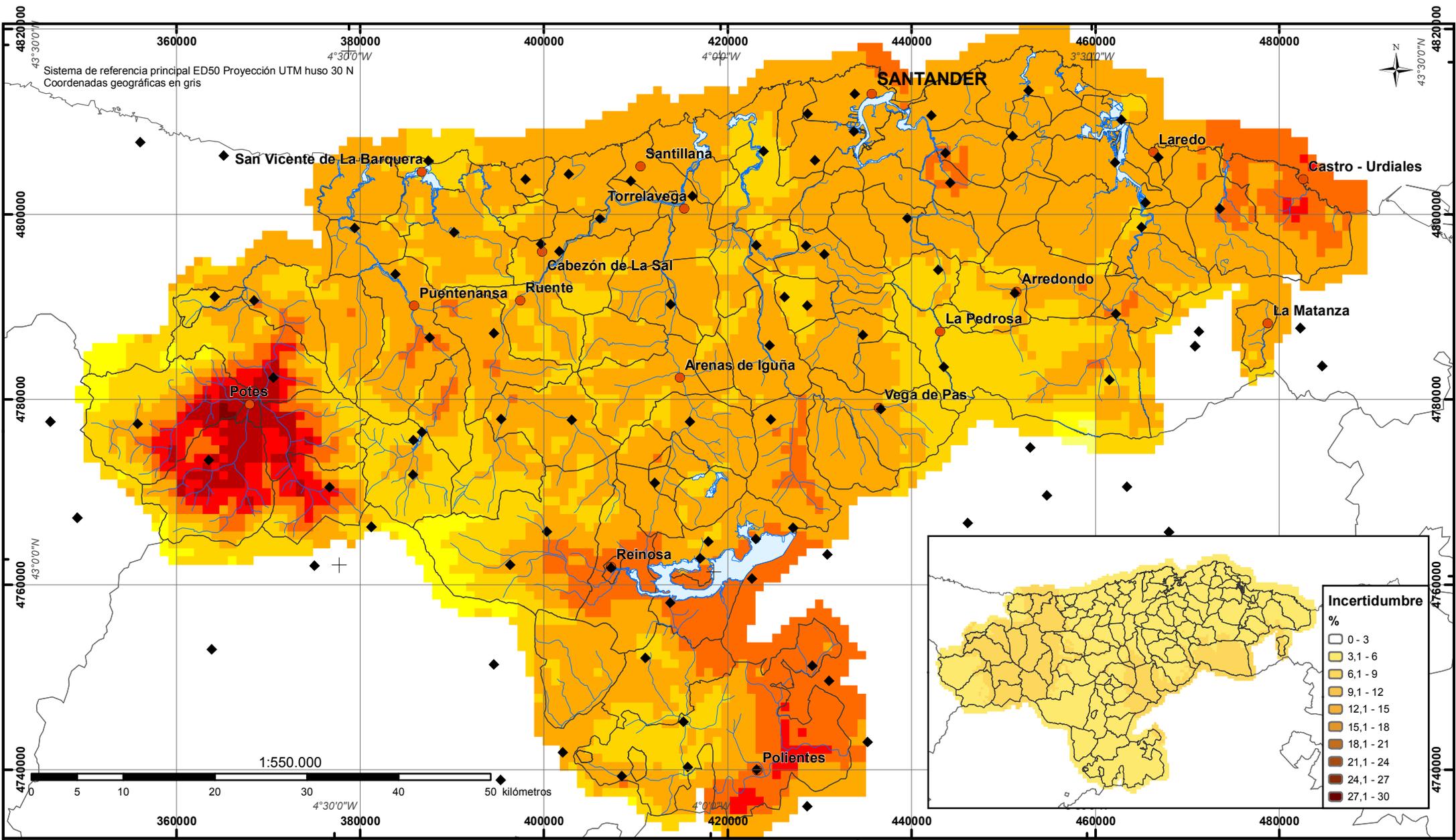
- Ríos
- Municipios
- Núcleos de población
- Estaciones meteorológicas

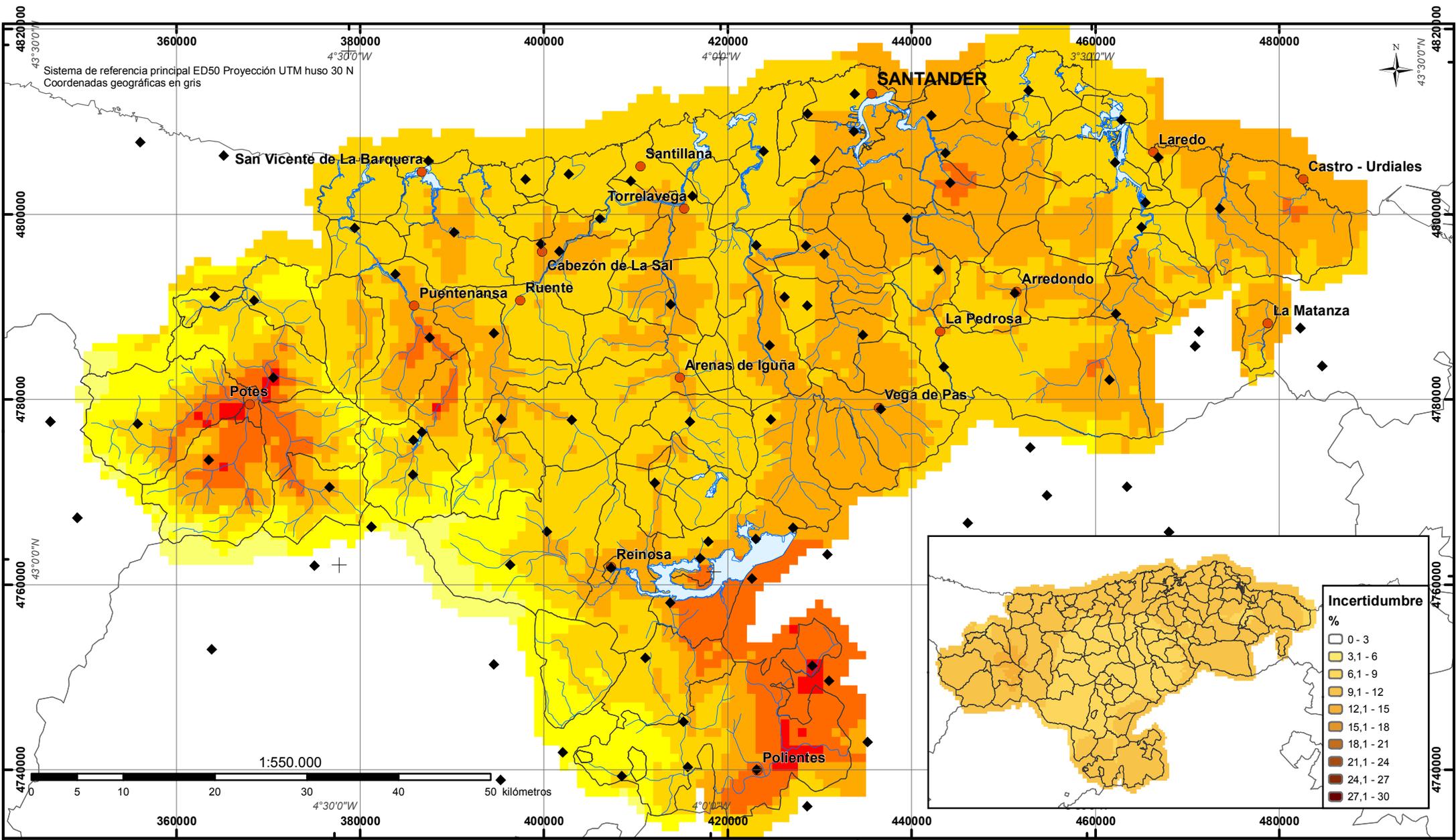
% variación

-45 - -40	-29 - -25	-14 - -10	1 - 5
-39 - -35	-24 - -20	-9 - -5	6 - 10
-34 - -30	-19 - -15	-4 - 0	11 - 15

Elaborado por SIG Rural S.L. www.sigrural.com







UC
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

CSIC

GOBIERNO de CANTABRIA
CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE

IFA
Instituto de Física de Cantabria

Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria

MAPA 1.2.7. PRECIPITACIÓN MEDIA. INVIERNO. 2040 - 2070. PORCENTAJE VARIACIÓN CON 1973-2003

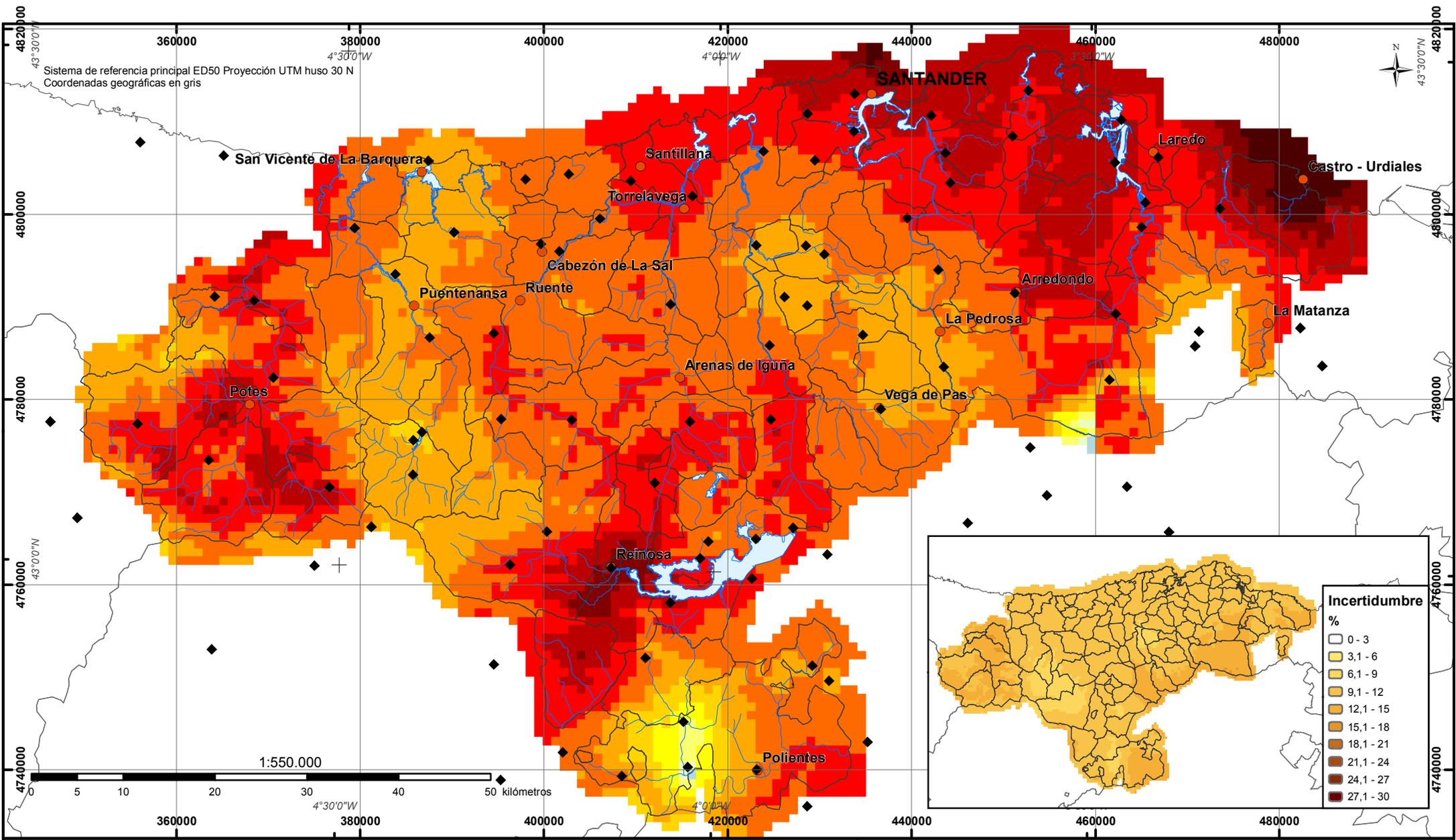
Legenda

- Ríos
- Municipios
- Núcleos de población
- Estaciones meteorológicas

% variación

-45 - -40	-29 - -25	-14 - -10	1 - 5
-39 - -35	-24 - -20	-9 - -5	6 - 10
-34 - -30	-19 - -15	-4 - 0	11 - 15

Elaborado por SIG Rural S.L. www.sigrural.com



Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria

MAPA 1.2.9. PRECIPITACIÓN MEDIA. VERANO. 2040 - 2070.

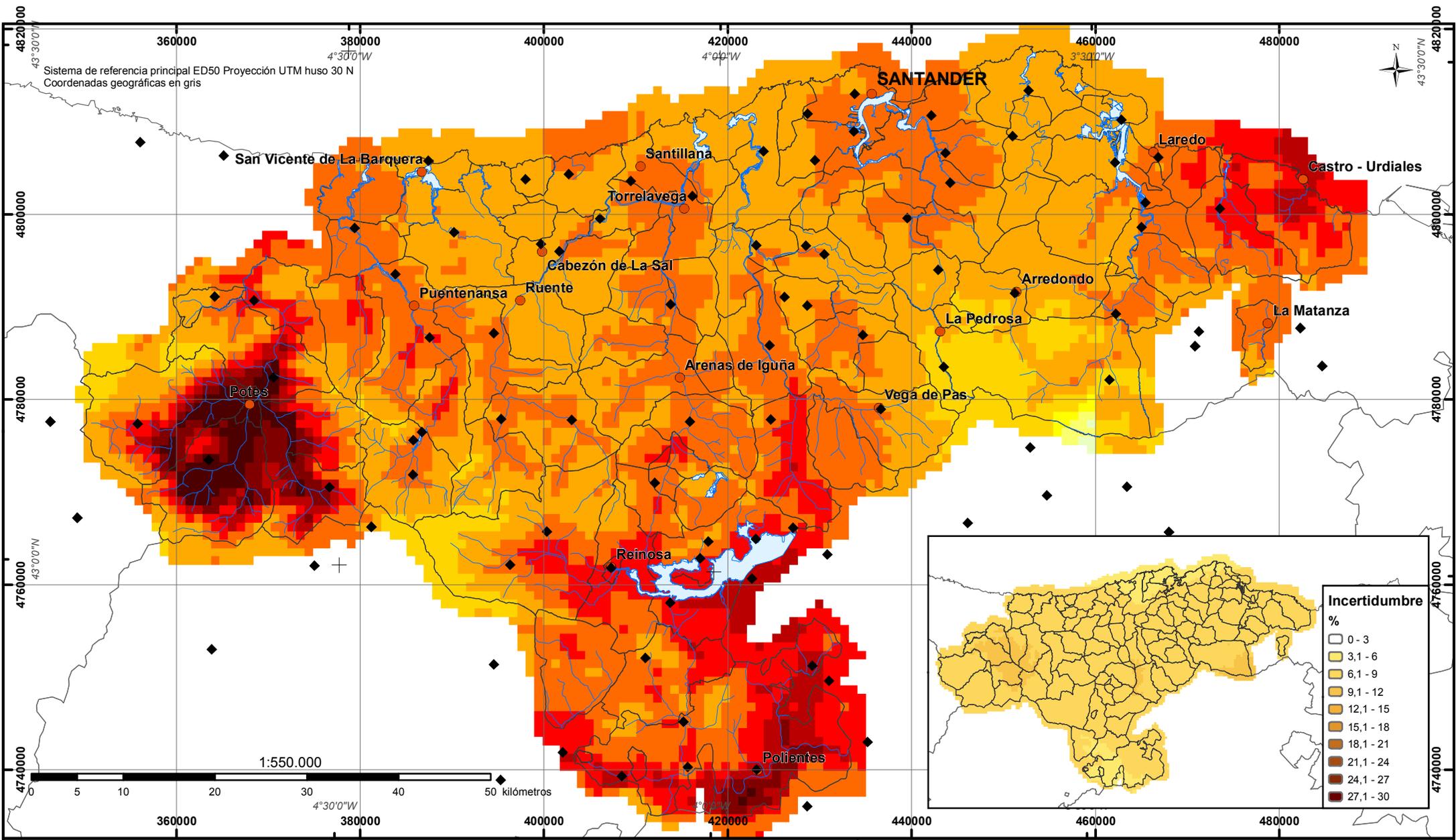
PORCENTAJE VARIACIÓN CON 1973-2003

Legenda

- Ríos
- Municipios
- Núcleos de población
- Estaciones meteorológicas

% variación			
-45 - -40	-29 - -25	-14 - -10	1 - 5
-39 - -35	-24 - -20	-9 - -5	6 - 10
-34 - -30	-19 - -15	-4 - 0	11 - 15

Elaborado por SIG Rural S.L. www.sigrural.com



Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria

MAPA 1.2.10. PRECIPITACIÓN MEDIA. OTOÑO. 2040 - 2070. PORCENTAJE VARIACIÓN CON 1973-2003

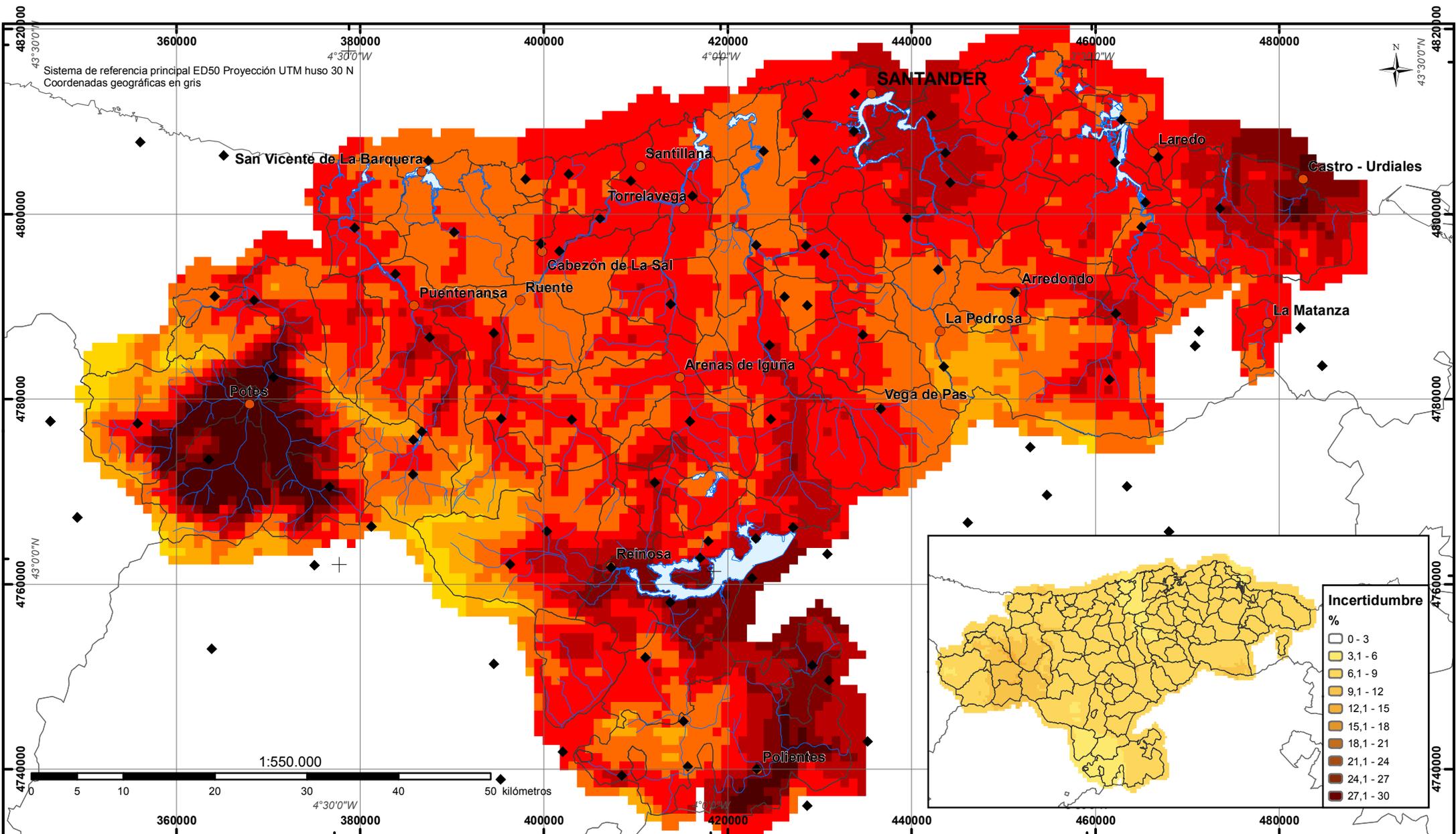
Legenda

- Ríos
- Municipios
- Núcleos de población
- Estaciones meteorológicas

% variación

-45 - -40	-29 - -25	-14 - -10	1 - 5
-39 - -35	-24 - -20	-9 - -5	6 - 10
-34 - -30	-19 - -15	-4 - 0	11 - 15

Elaborado por SIG Rural S.L. www.sigrural.com



Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria
MAPA 1.2.11. PRECIPITACIÓN MEDIA. ANUAL. 2070 - 2100.
PORCENTAJE VARIACIÓN CON 1973-2003

Legenda

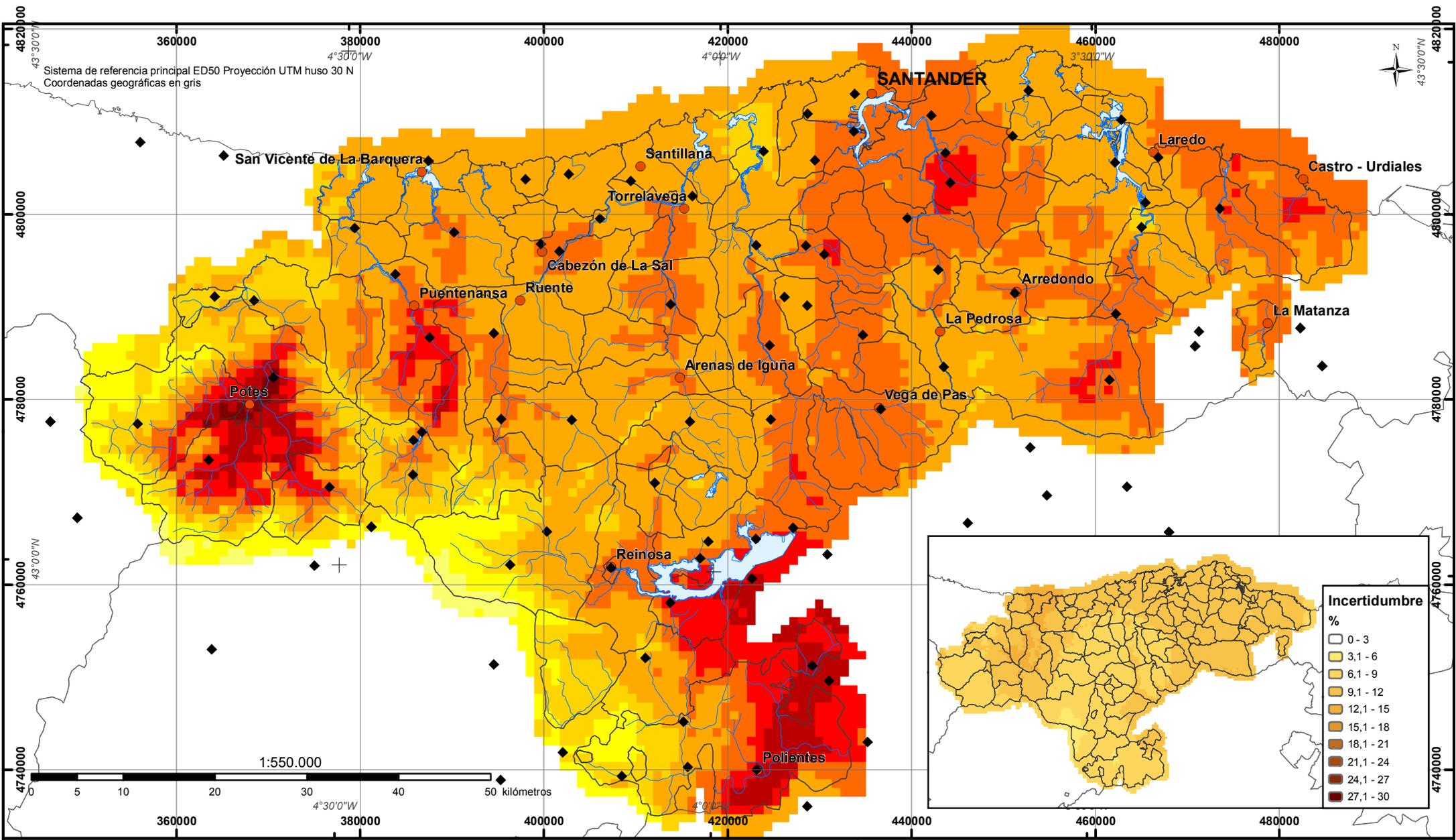
- Ríos
- Municipios
- Núcleos de población
- Estaciones meteorológicas

% variación			
-45 - -40	-29 - -25	-14 - -10	1 - 5
-39 - -35	-24 - -20	-9 - -5	6 - 10
-34 - -30	-19 - -15	-4 - 0	11 - 15

Incertidumbre

0 - 3
3,1 - 6
6,1 - 9
9,1 - 12
12,1 - 15
15,1 - 18
18,1 - 21
21,1 - 24
24,1 - 27
27,1 - 30

Elaborado por SIG Rural S.L. www.sigrural.com



Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria
MAPA 1.2.12. PRECIPITACIÓN MEDIA. INVIERNO. 2070 - 2100.
PORCENTAJE VARIACIÓN CON 1973-2003

Legenda

- Ríos
- Municipios
- Núcleos de población
- Estaciones meteorológicas

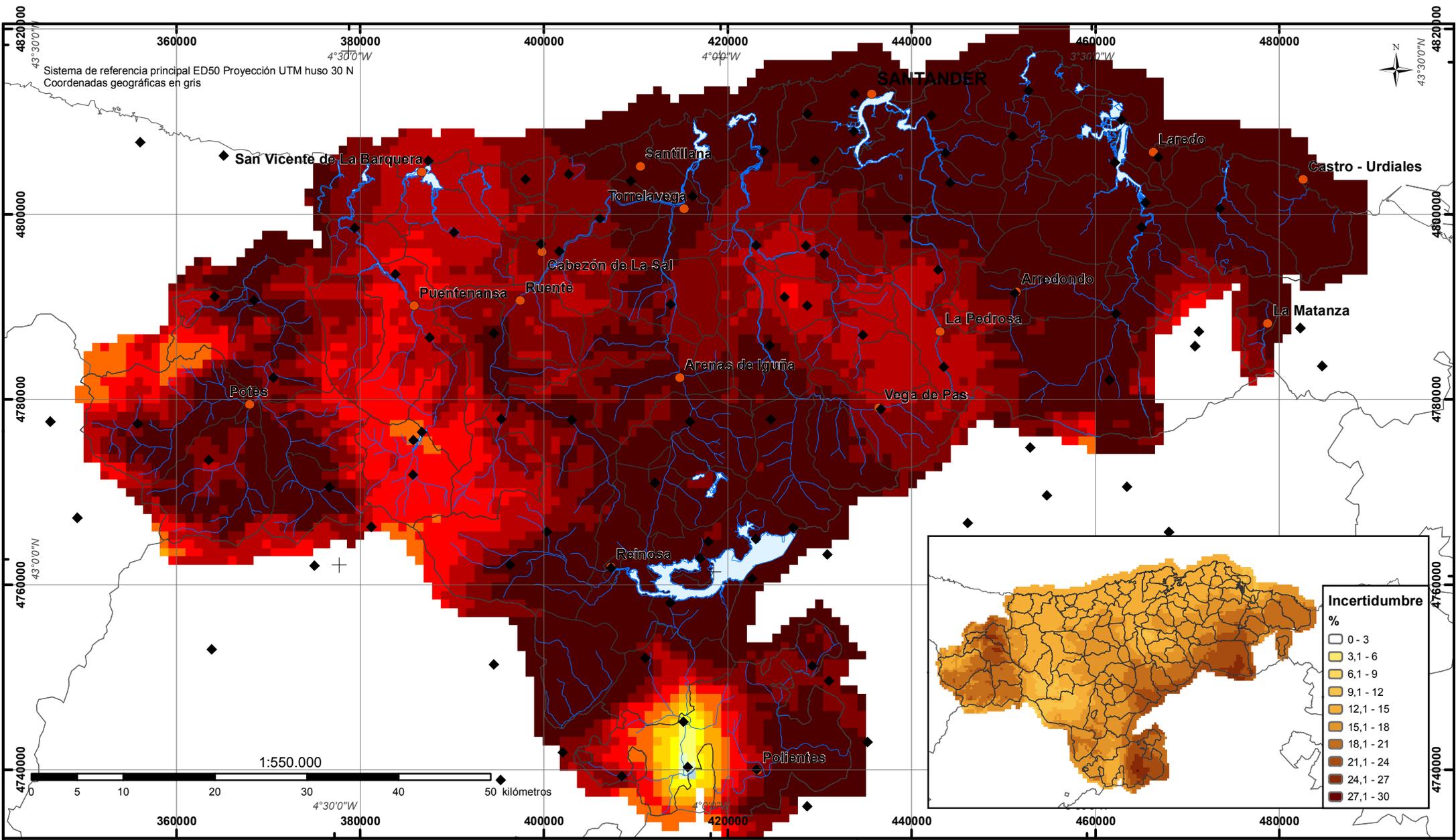
% variación

-45 - -40	-29 - -25	-14 - -10	1 - 5
-39 - -35	-24 - -20	-9 - -5	6 - 10
-34 - -30	-19 - -15	-4 - 0	11 - 15

Incertidumbre

0 - 3
3,1 - 6
6,1 - 9
9,1 - 12
12,1 - 15
15,1 - 18
18,1 - 21
21,1 - 24
24,1 - 27
27,1 - 30

Elaborado por SIG Rural S.L. www.sigrural.com



Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria
MAPA 1.2.14. PRECIPITACIÓN MEDIA. VERANO. 2070 - 2100.
PORCENTAJE VARIACIÓN CON 1973-2003

Leyenda

- Ríos
- Municipios
- Núcleos de población
- Estaciones meteorológicas

% variación

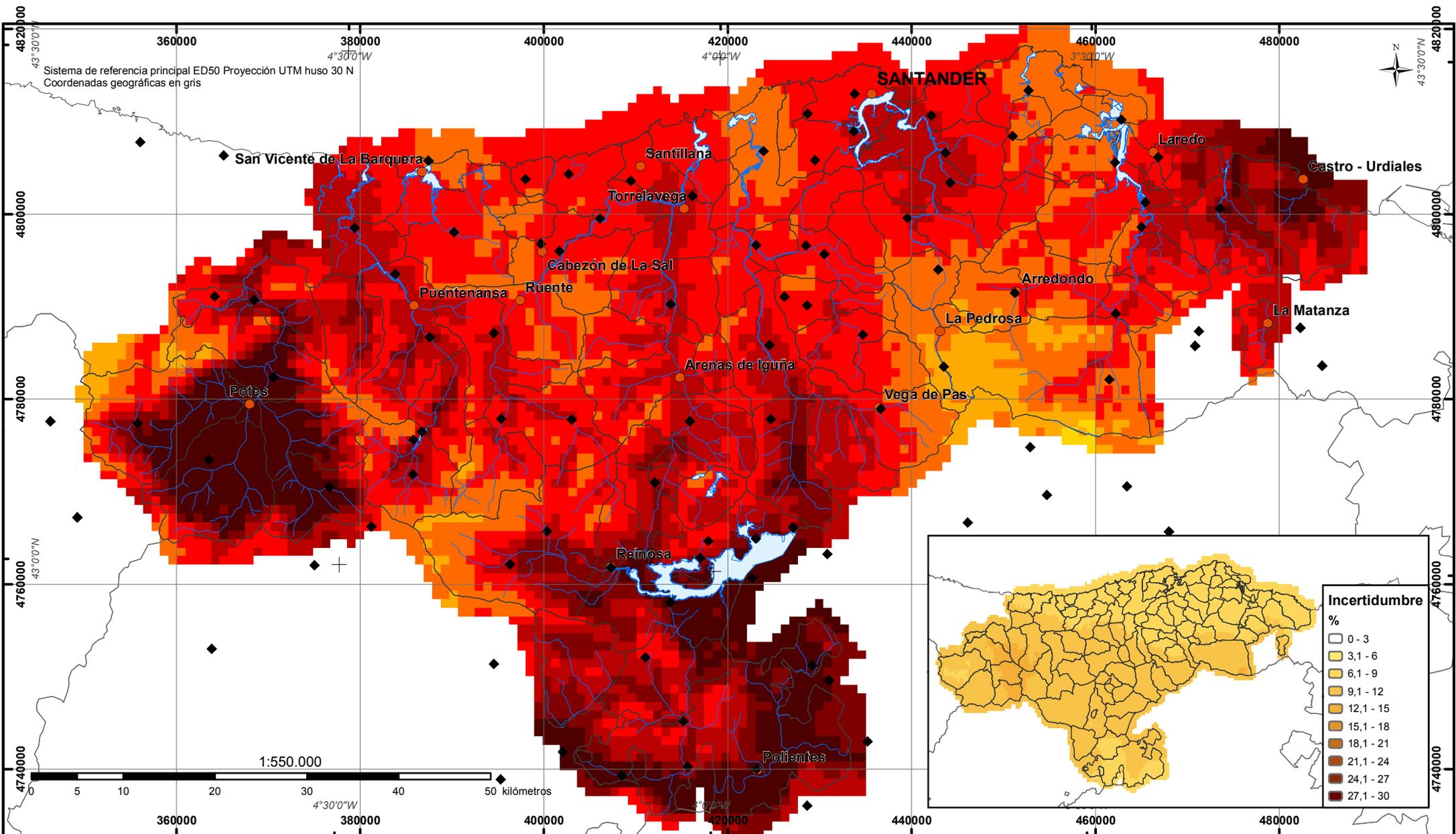
-45 - -40	-29 - -25	-14 - -10	1 - 5
-39 - -35	-24 - -20	-9 - -5	6 - 10
-34 - -30	-19 - -15	-4 - 0	11 - 15

Elaborado por SIG Rural S.L. www.sigrural.com

Incertidumbre

%

	0 - 3
	3,1 - 6
	6,1 - 9
	9,1 - 12
	12,1 - 15
	15,1 - 18
	18,1 - 21
	21,1 - 24
	24,1 - 27
	27,1 - 30



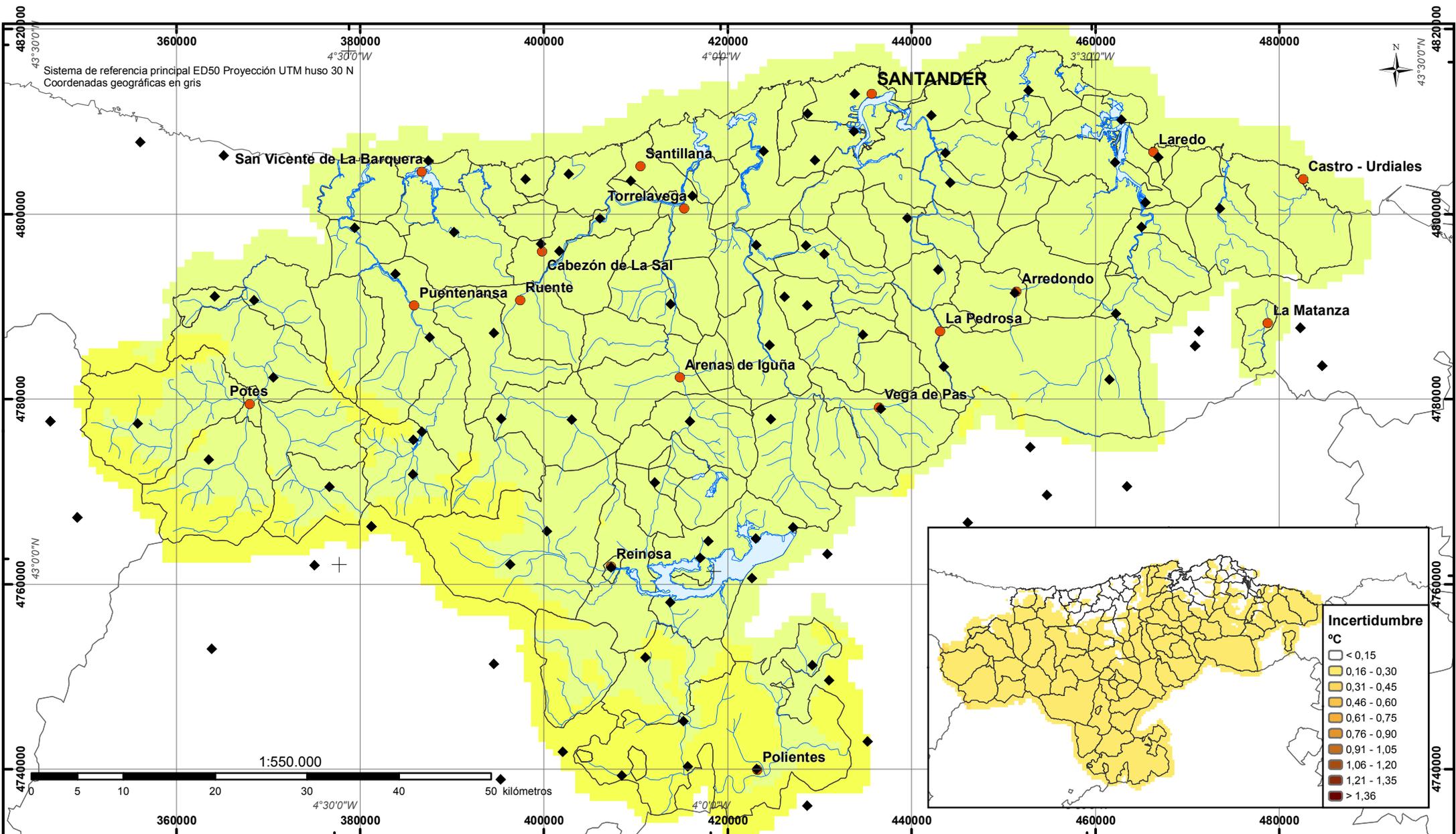
Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria
MAPA 1.2.15. PRECIPITACIÓN MEDIA. OTOÑO. 2070 - 2100.
PORCENTAJE VARIACIÓN CON 1973-2003

Legenda

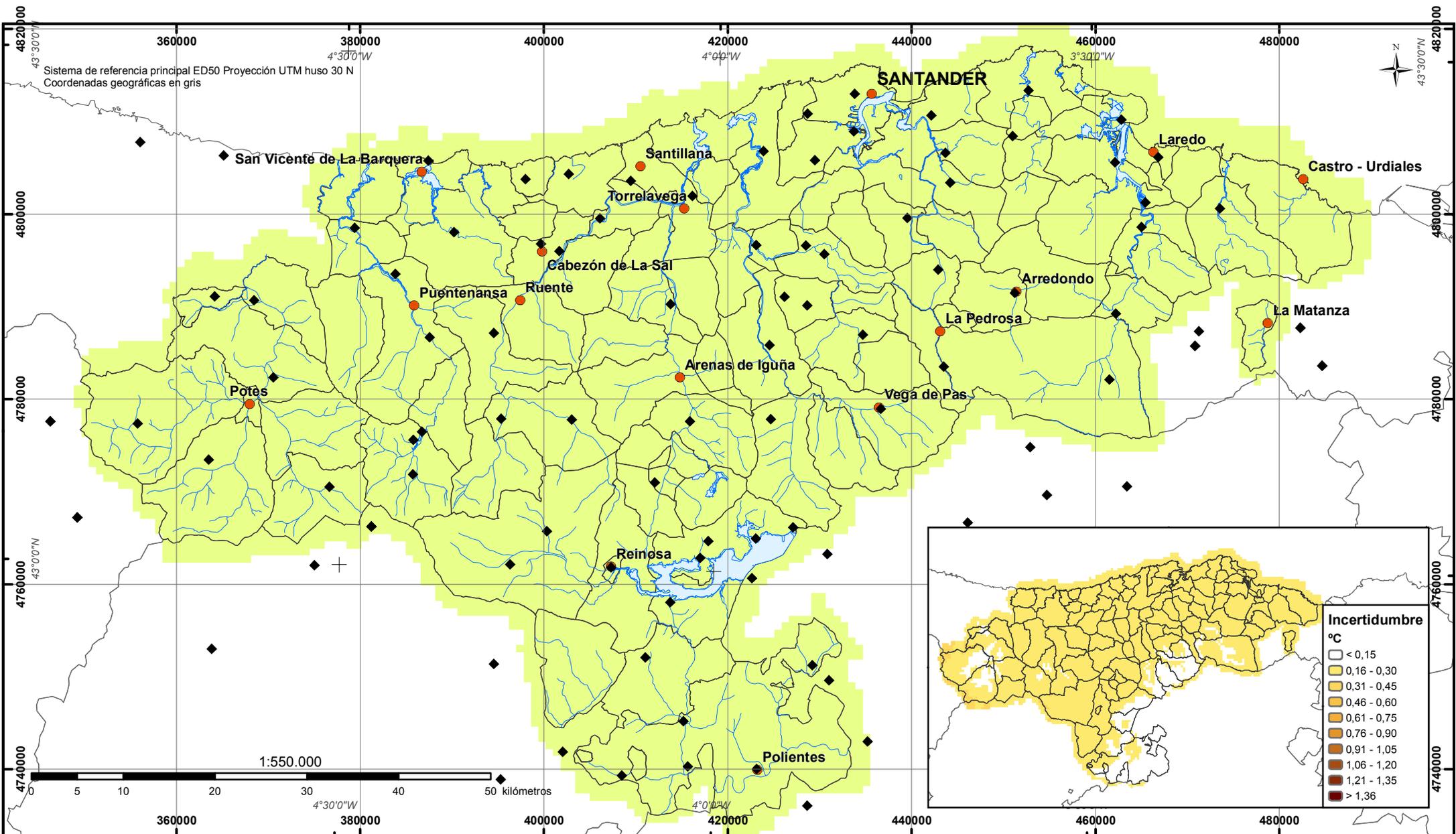
- Ríos
- Municipios
- Núcleos de población
- Estaciones meteorológicas

% variación			
-45 - -40	-29 - -25	-14 - -10	1 - 5
-39 - -35	-24 - -20	-9 - -5	6 - 10
-34 - -30	-19 - -15	-4 - 0	11 - 15

Elaborado por SIG Rural S.L. www.sigrural.com



Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria
MAPA 2.2.1. TEMPERATURA MÁXIMA MEDIA. ANUAL. 2010 - 2040. VARIACIÓN CON 1973-2003



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
GOBIERNO de CANTABRIA
CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE
INSTITUTO DE FÍSICA DE CANTABRIA

Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria

MAPA 2.2.2. TEMPERATURA MÁXIMA MEDIA. INVIERNO. 2010 - 2040. VARIACIÓN CON 1973-2003

Leyenda

- Ríos
- Municipios
- Núcleos de población
- Estaciones meteorológicas

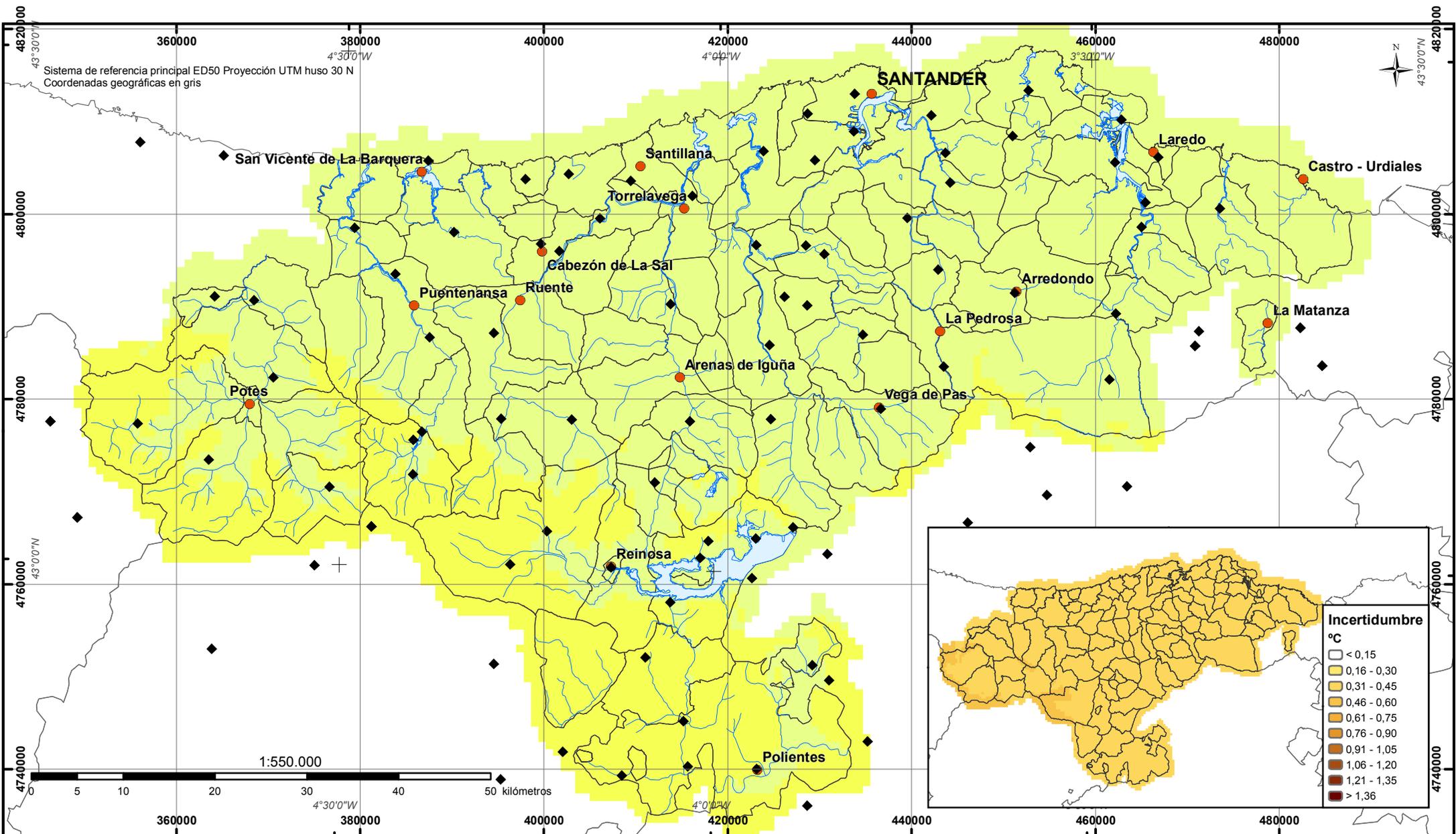
°C

< 0,5	1,6 - 2,0	3,1 - 3,5	4,6 - 5,0
0,6 - 1,0	2,1 - 2,5	3,6 - 4,0	5,1 - 5,5
1,1 - 1,5	2,6 - 3,0	4,1 - 4,5	> 6,0

Elaborado por SIG Rural S.L. www.sigrural.com

Incertidumbre °C

	< 0,15
	0,16 - 0,30
	0,31 - 0,45
	0,46 - 0,60
	0,61 - 0,75
	0,76 - 0,90
	0,91 - 1,05
	1,06 - 1,20
	1,21 - 1,35
	> 1,36



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
GOBIERNO de CANTABRIA
CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE
INSTITUTO DE FÍSICA DE CANTABRIA

Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria

MAPA 2.2.5. TEMPERATURA MÁXIMA MEDIA. OTOÑO. 2010 - 2040. VARIACIÓN CON 1973-2003

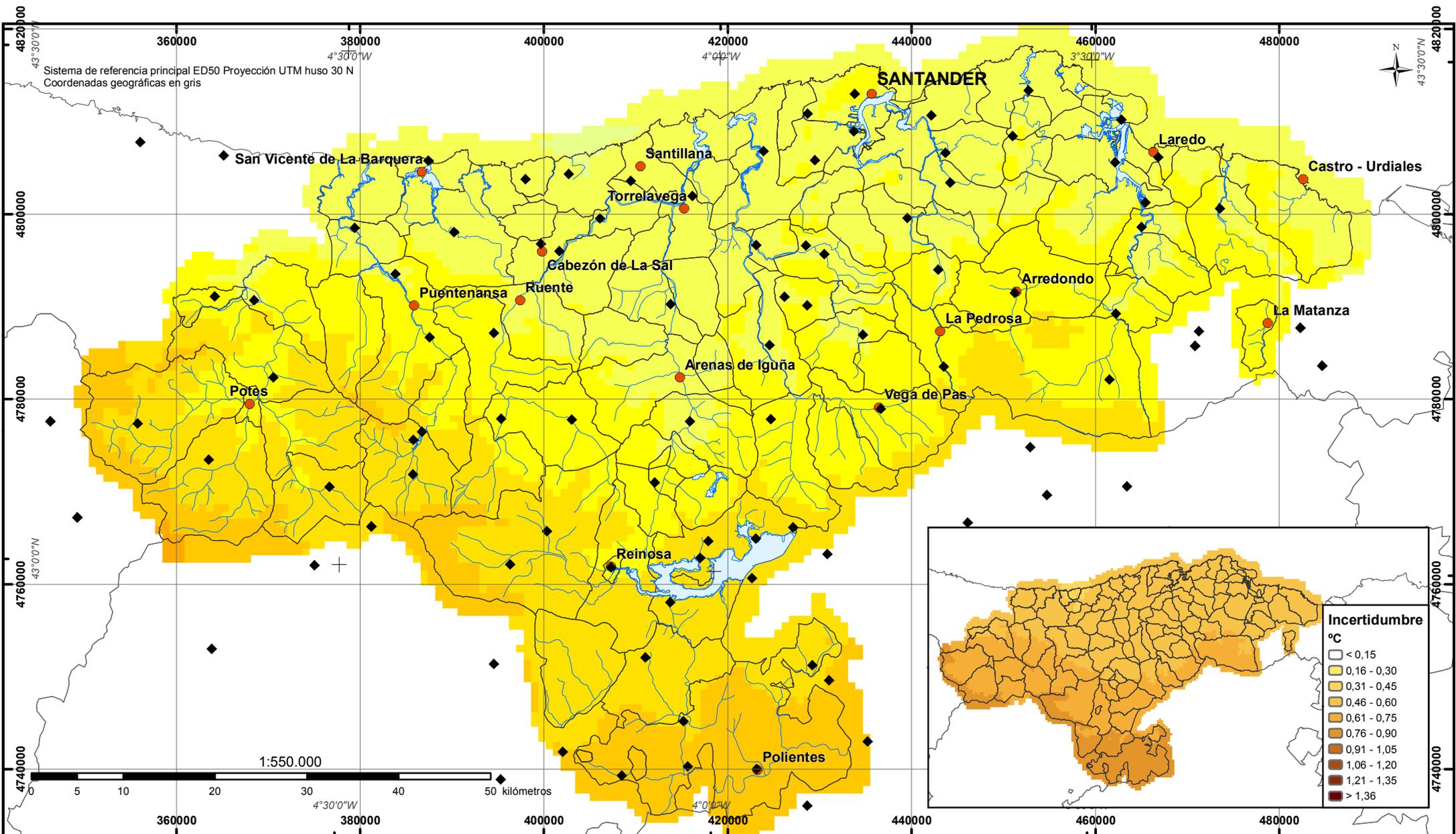
Leyenda

- Ríos
- Municipios
- Núcleos de población
- Estaciones meteorológicas

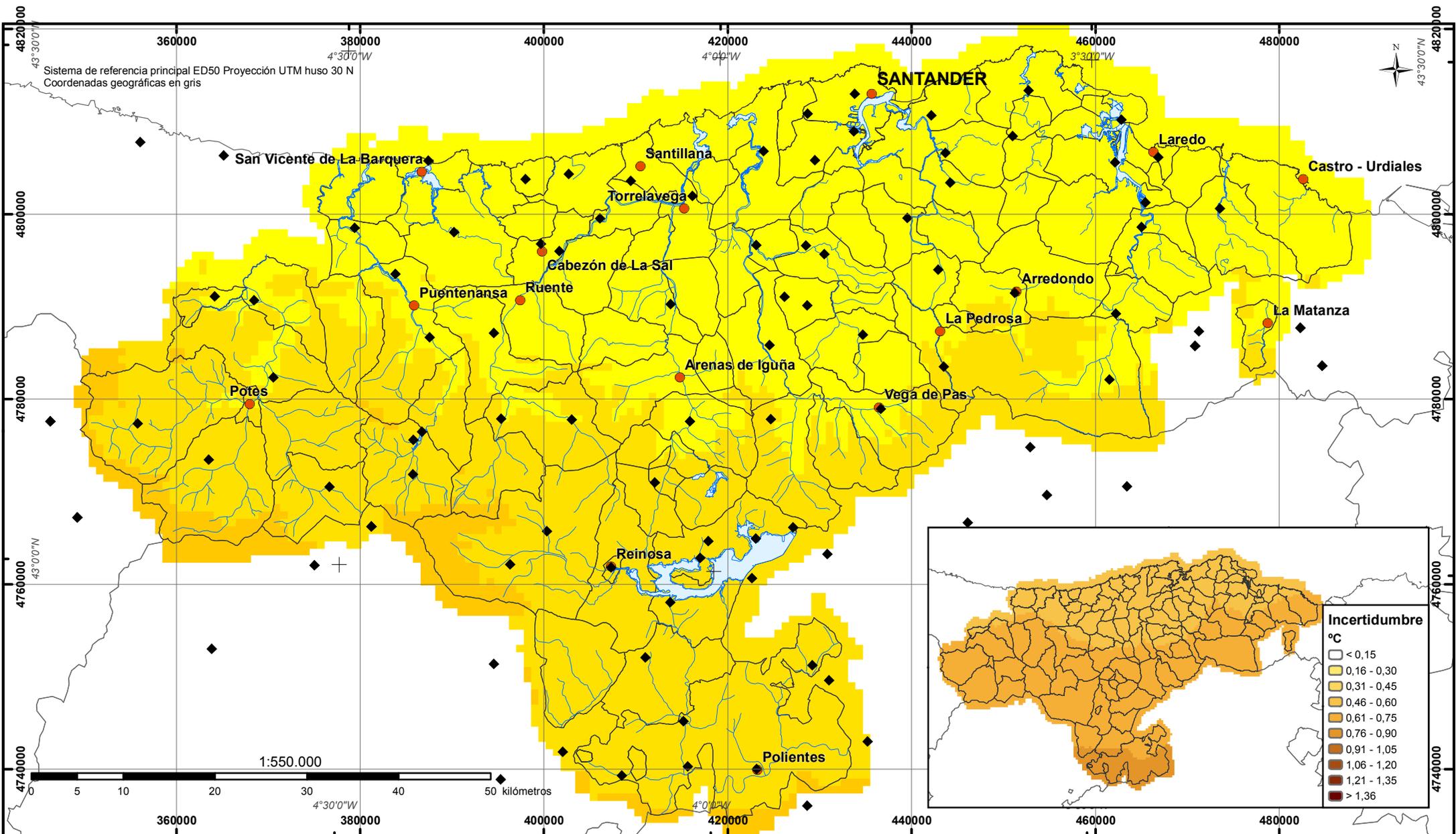
°C

< 0,5	1,6 - 2,0	3,1 - 3,5	4,6 - 5,0
0,6 - 1,0	2,1 - 2,5	3,6 - 4,0	5,1 - 5,5
1,1 - 1,5	2,6 - 3,0	4,1 - 4,5	> 6,0

Elaborado por SIG Rural S.L. www.sigrural.com

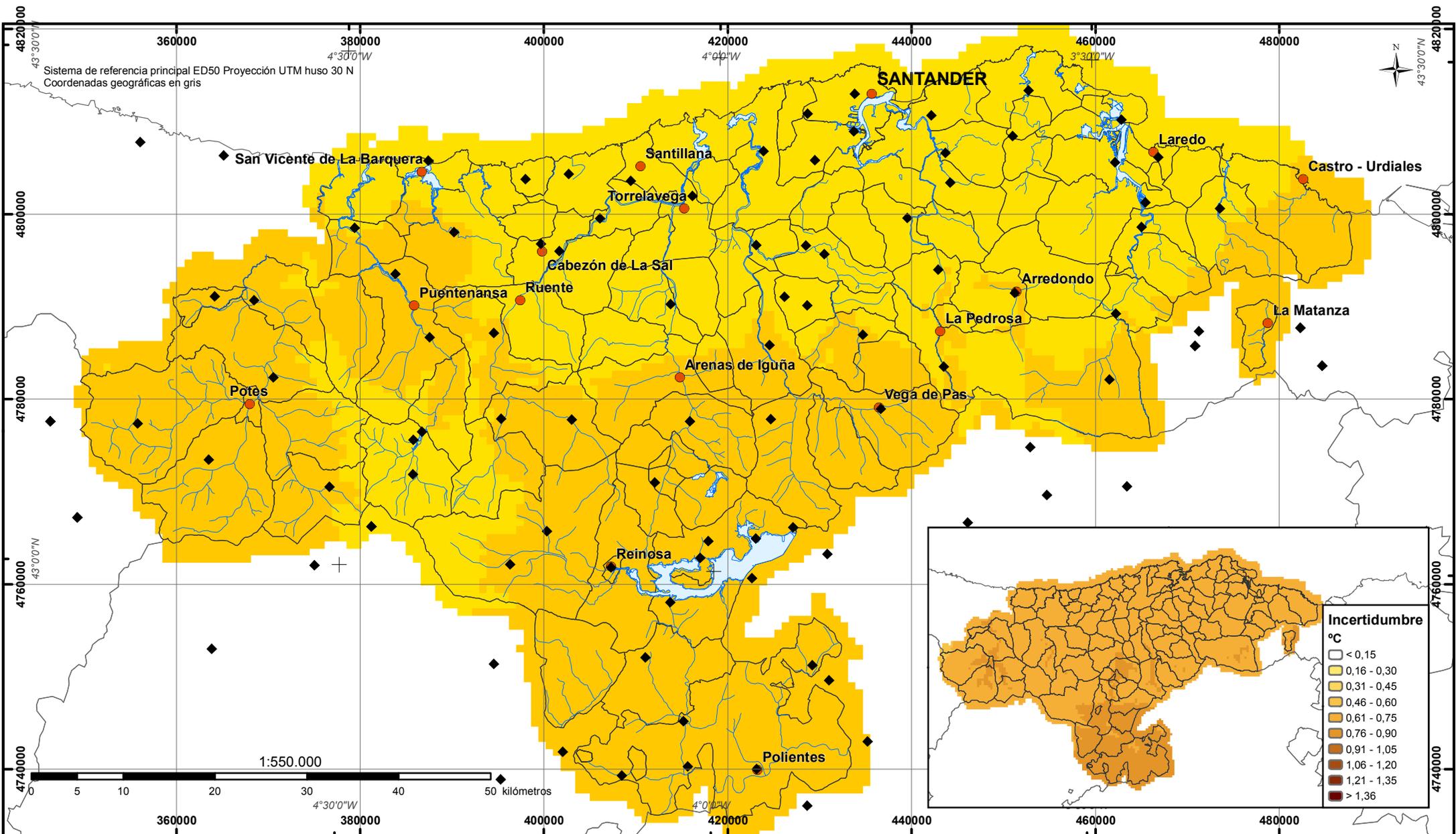


Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria
MAPA 2.2.9. TEMPERATURA MÁXIMA MEDIA. VERANO. 2040 - 2070. VARIACIÓN CON 1973-2003



Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria

MAPA 2.2.10. TEMPERATURA MÁXIMA MEDIA. OTOÑO. 2040 - 2070. VARIACIÓN CON 1973-2003



Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria

MAPA 2.2.12. TEMPERATURA MÁXIMA MEDIA. INVIERNO. 2070 - 2100. VARIACIÓN CON 1973-2003

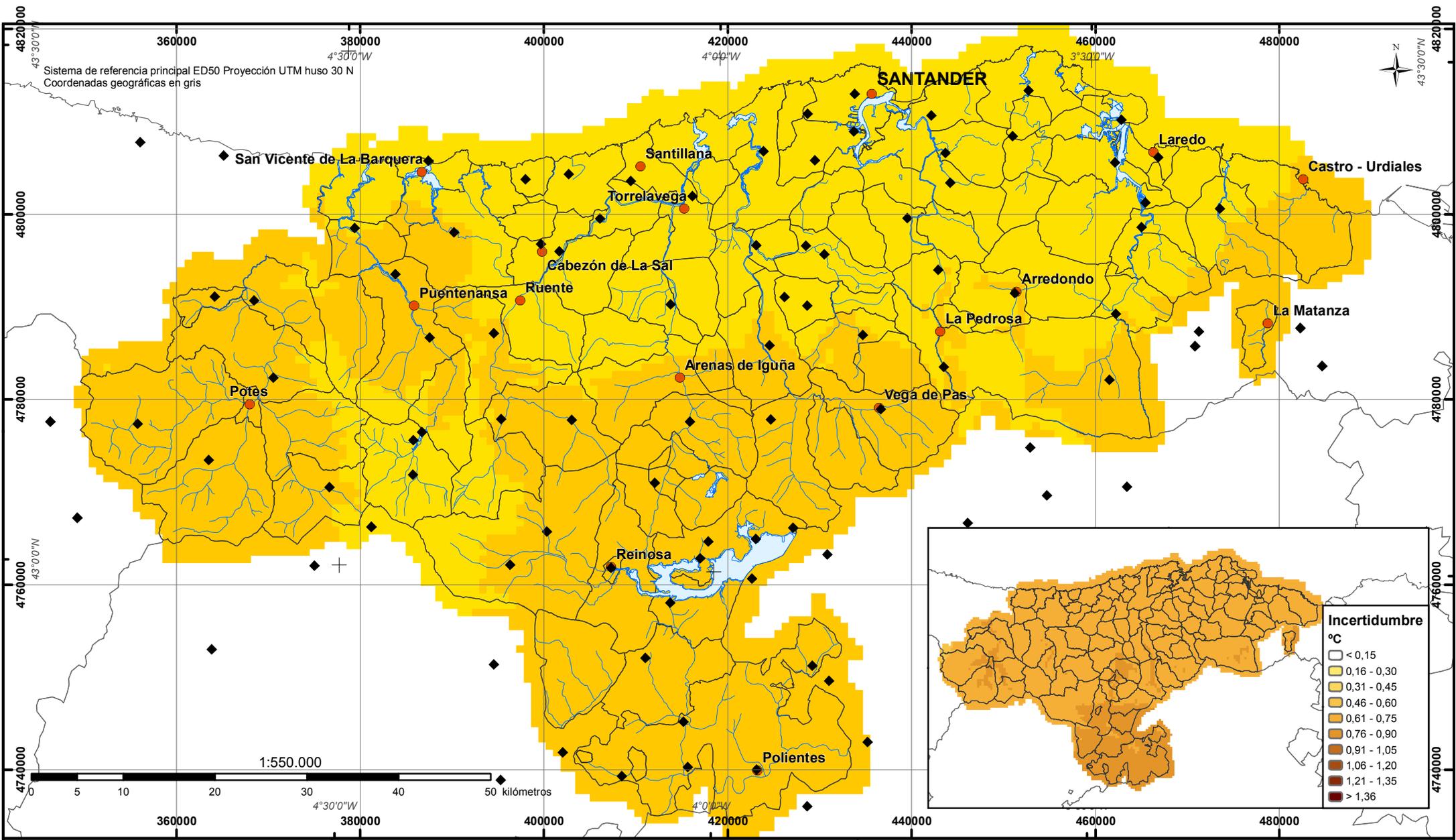
Leyenda

- Ríos
- Municipios
- Núcleos de población
- Estaciones meteorológicas

°C

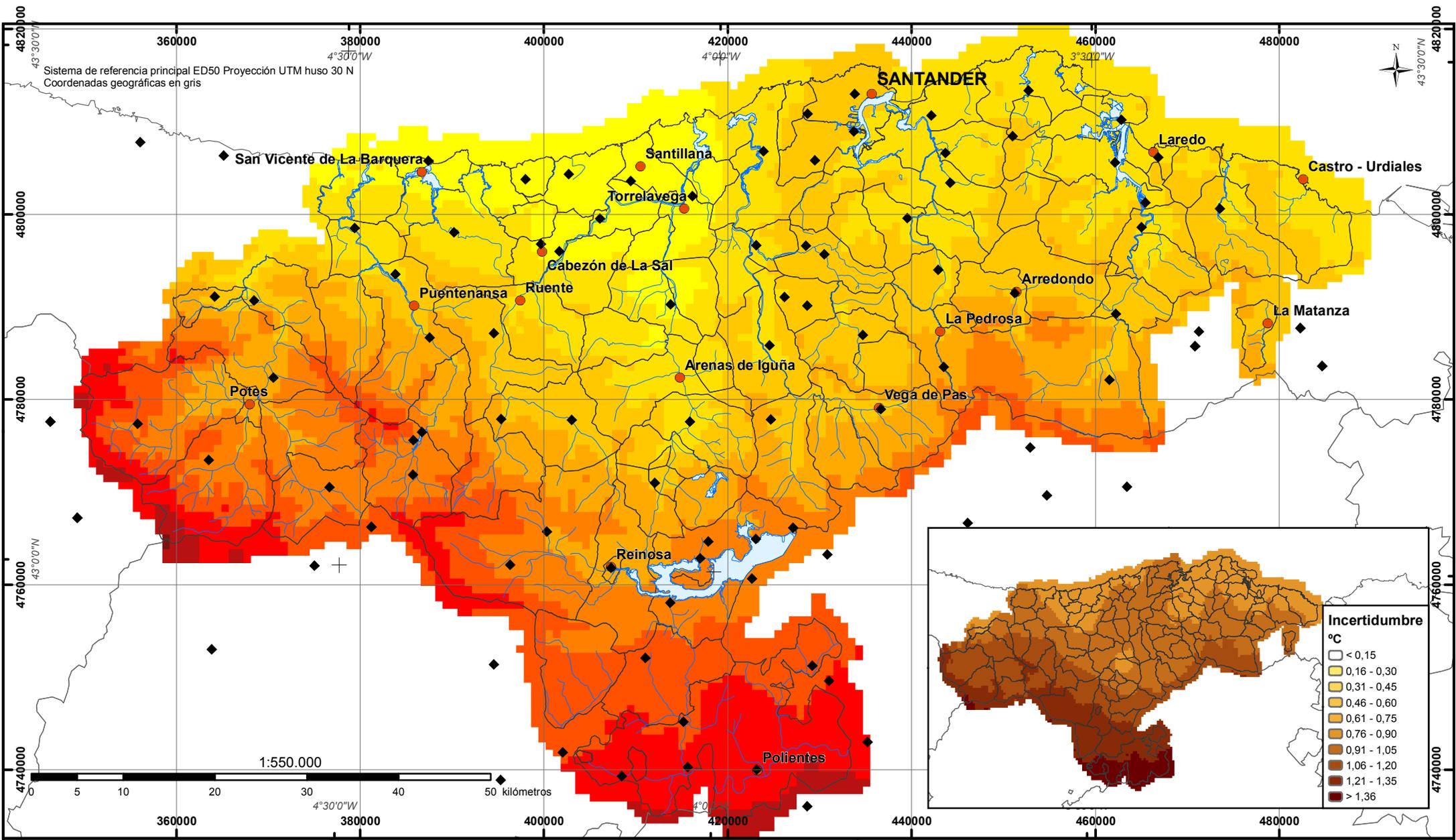
< 0,5	1,6 - 2,0	3,1 - 3,5	4,6 - 5,0
0,6 - 1,0	2,1 - 2,5	3,6 - 4,0	5,1 - 5,5
1,1 - 1,5	2,6 - 3,0	4,1 - 4,5	> 6,0

Elaborado por SIG Rural S.L. www.sigrural.com



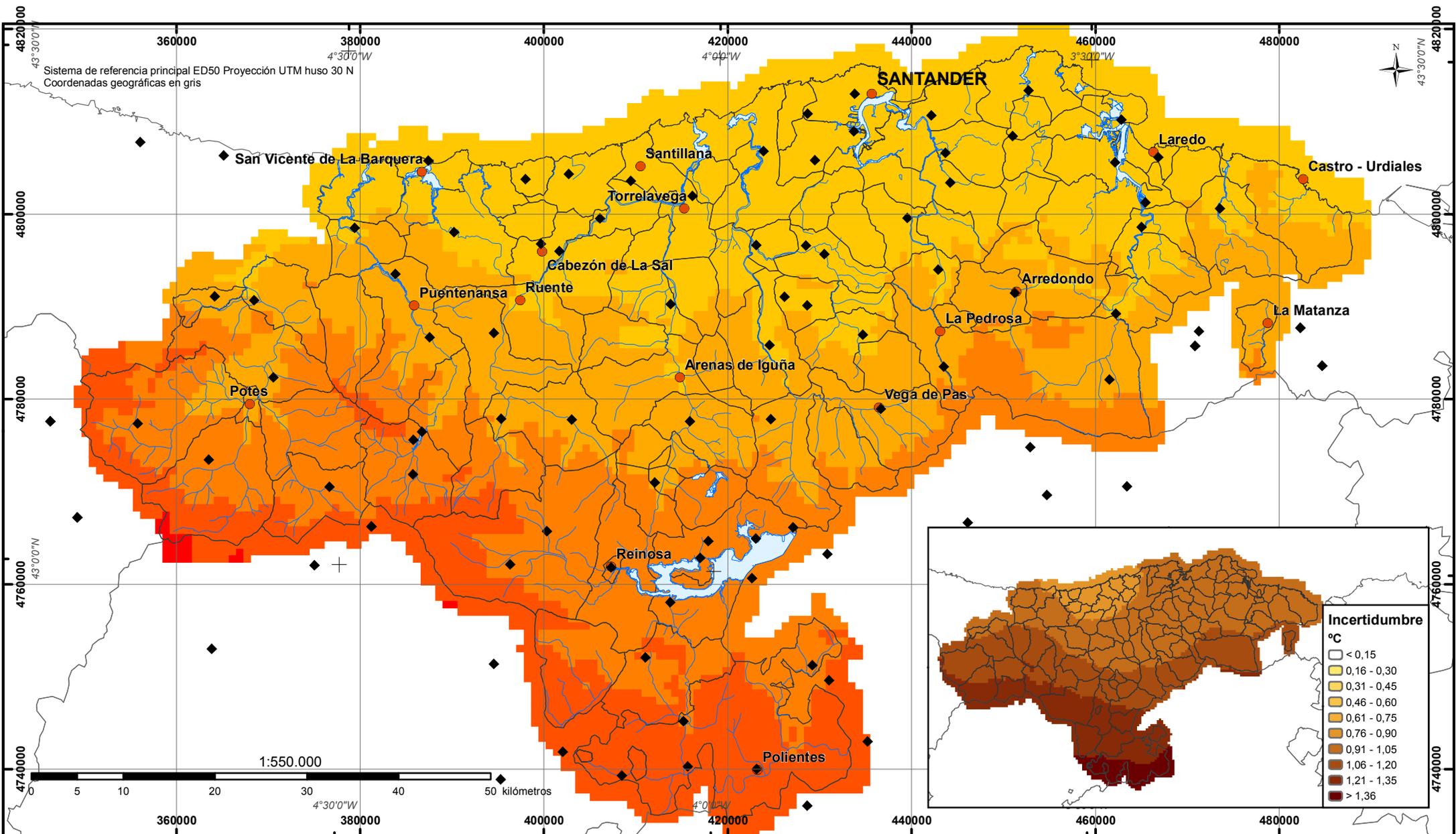
Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria

MAPA 2.2.13. TEMPERATURA MÁXIMA MEDIA. PRIMAVERA. 2070 - 2100. VARIACIÓN CON 1973-2003

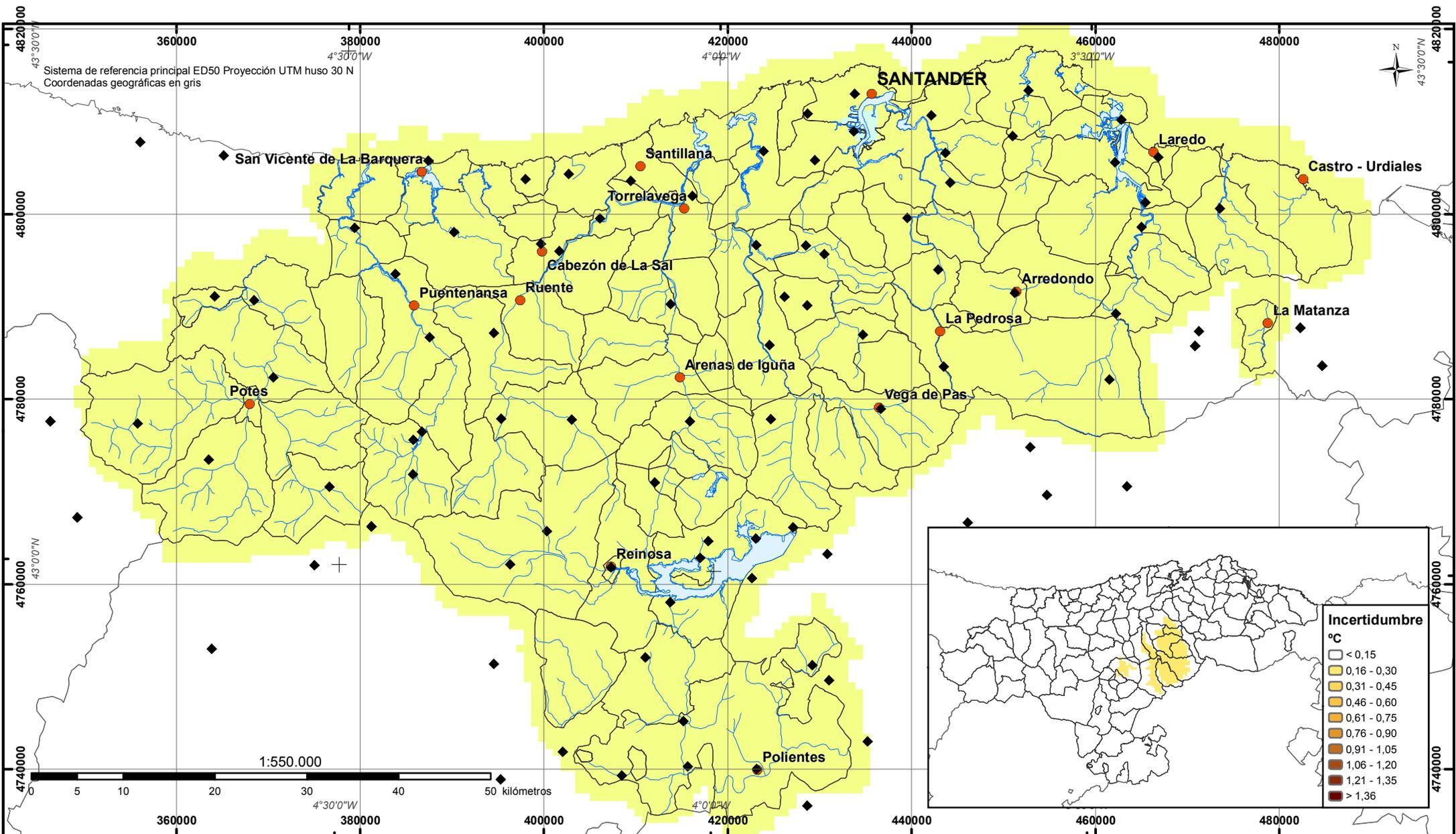


Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria

MAPA 2.2.14. TEMPERATURA MÁXIMA MEDIA. VERANO. 2070 - 2100. VARIACIÓN CON 1973-2003



Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria
MAPA 2.2.15. TEMPERATURA MÁXIMA MEDIA. OTOÑO. 2070 - 2100. VARIACIÓN CON 1973-2003



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
GOBIERNO de CANTABRIA
CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE
INSTITUTO DE FÍSICA DE CANTABRIA

Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria

MAPA 3.2.2. TEMPERATURA MÍNIMA MEDIA. INVIERNO. 2010 - 2040. VARIACIÓN CON 1973-2003

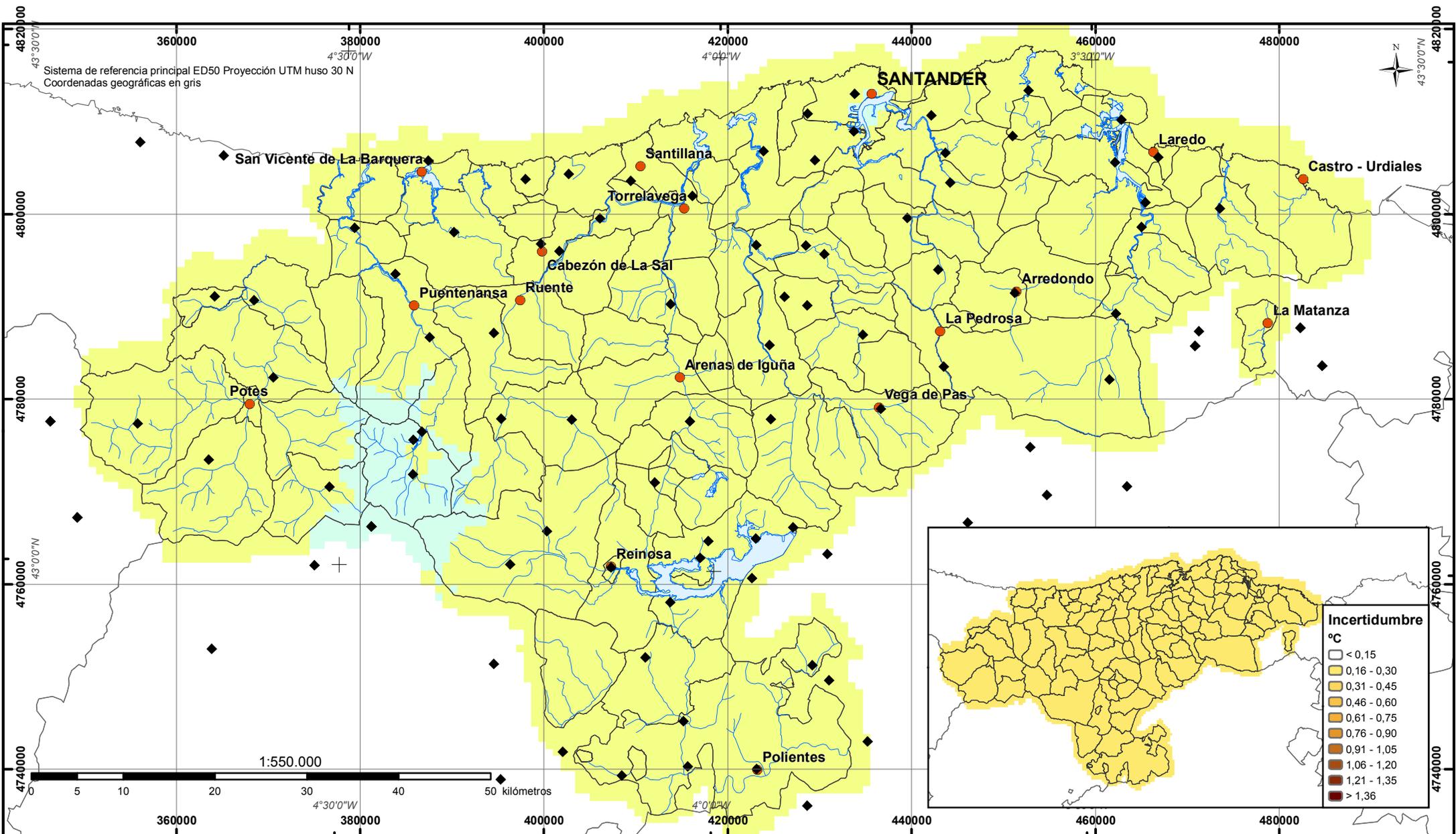
Leyenda

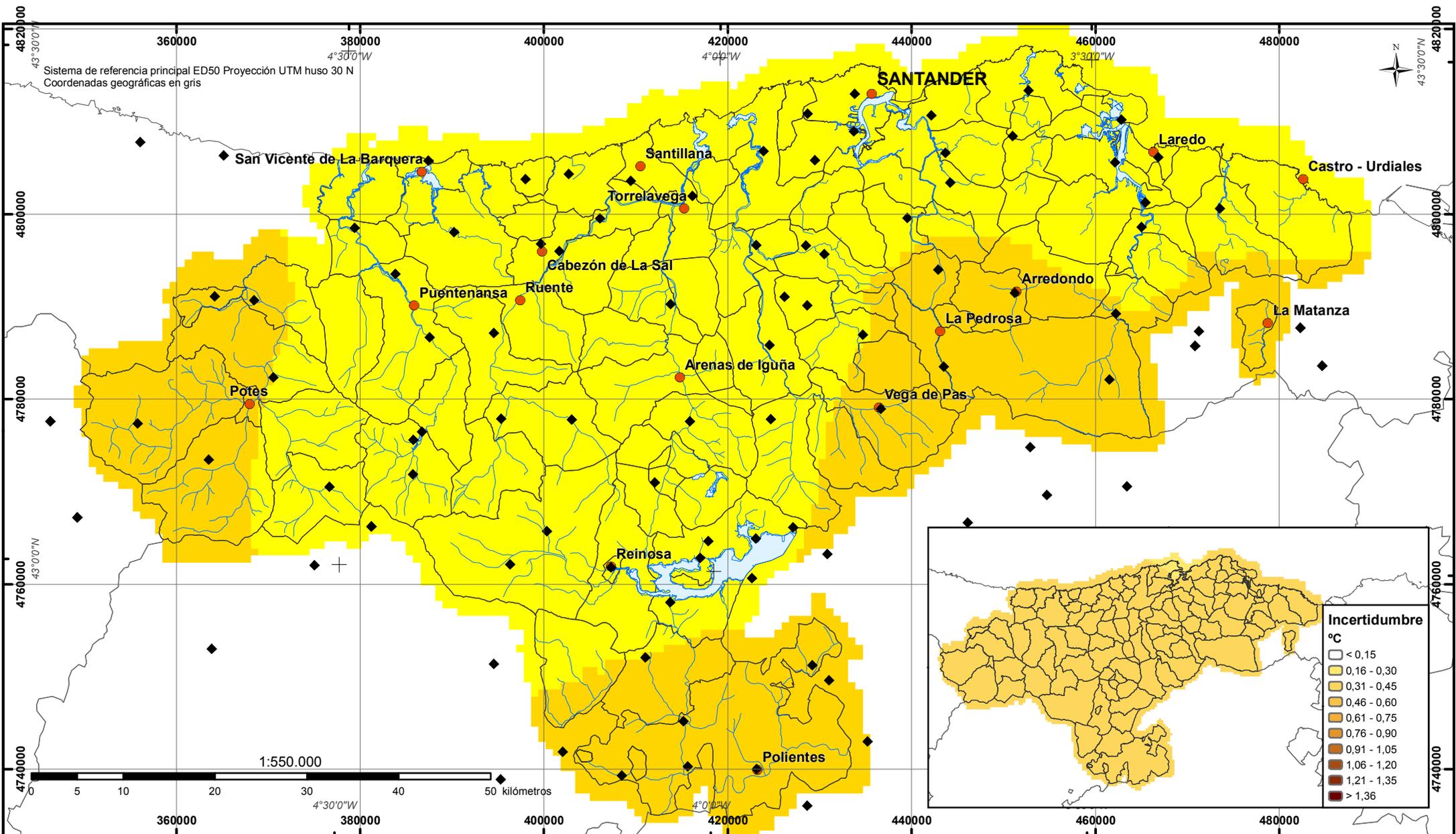
- Ríos
- Municipios
- Núcleos de población
- Estaciones meteorológicas

°C

< 0,5	1,6 - 2,0	3,1 - 3,5	4,6 - 5,0
0,6 - 1,0	2,1 - 2,5	3,6 - 4,0	5,1 - 5,5
1,1 - 1,5	2,6 - 3,0	4,1 - 4,5	> 6,0

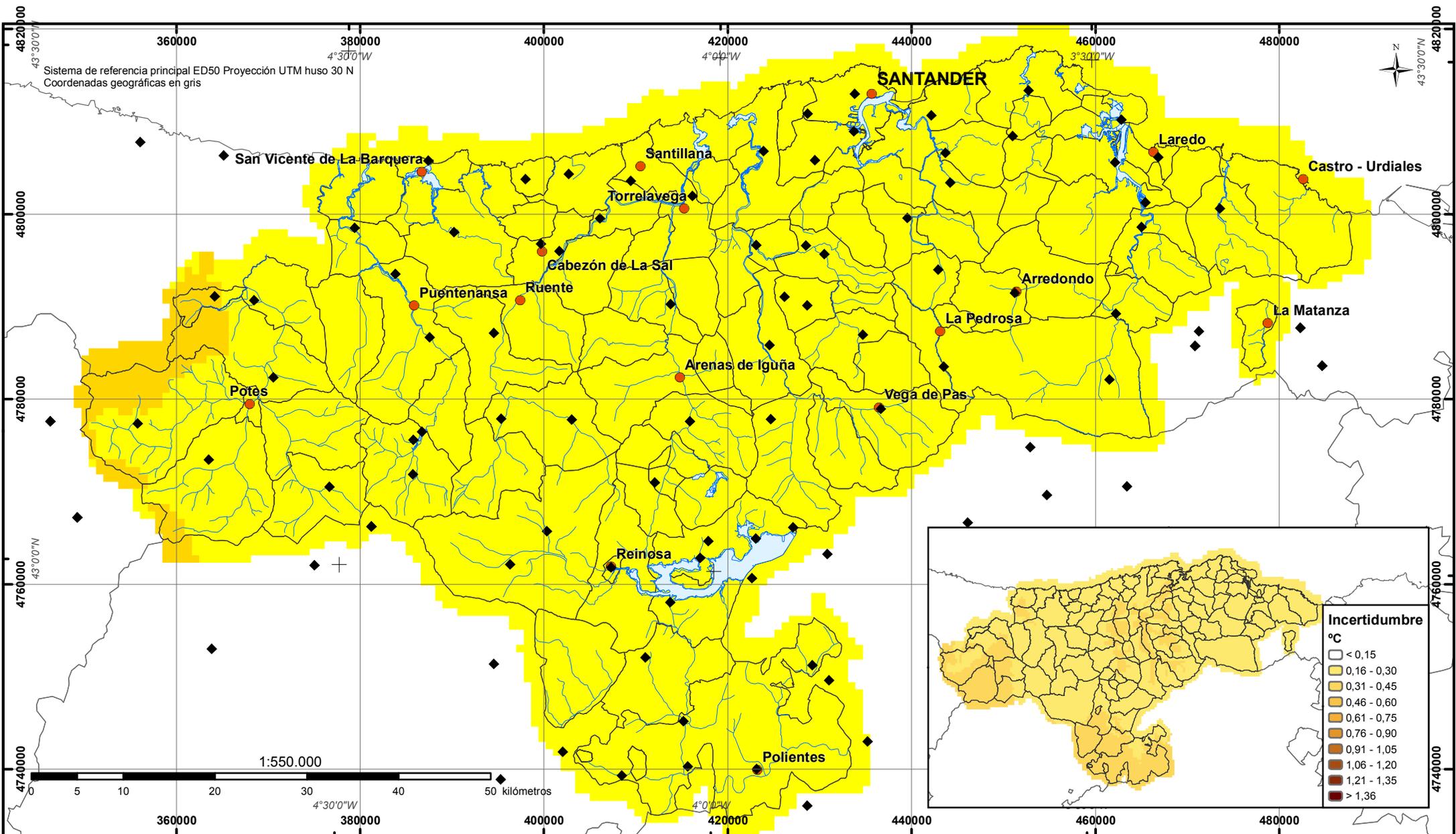
Elaborado por SIG Rural S.L. www.sigrural.com





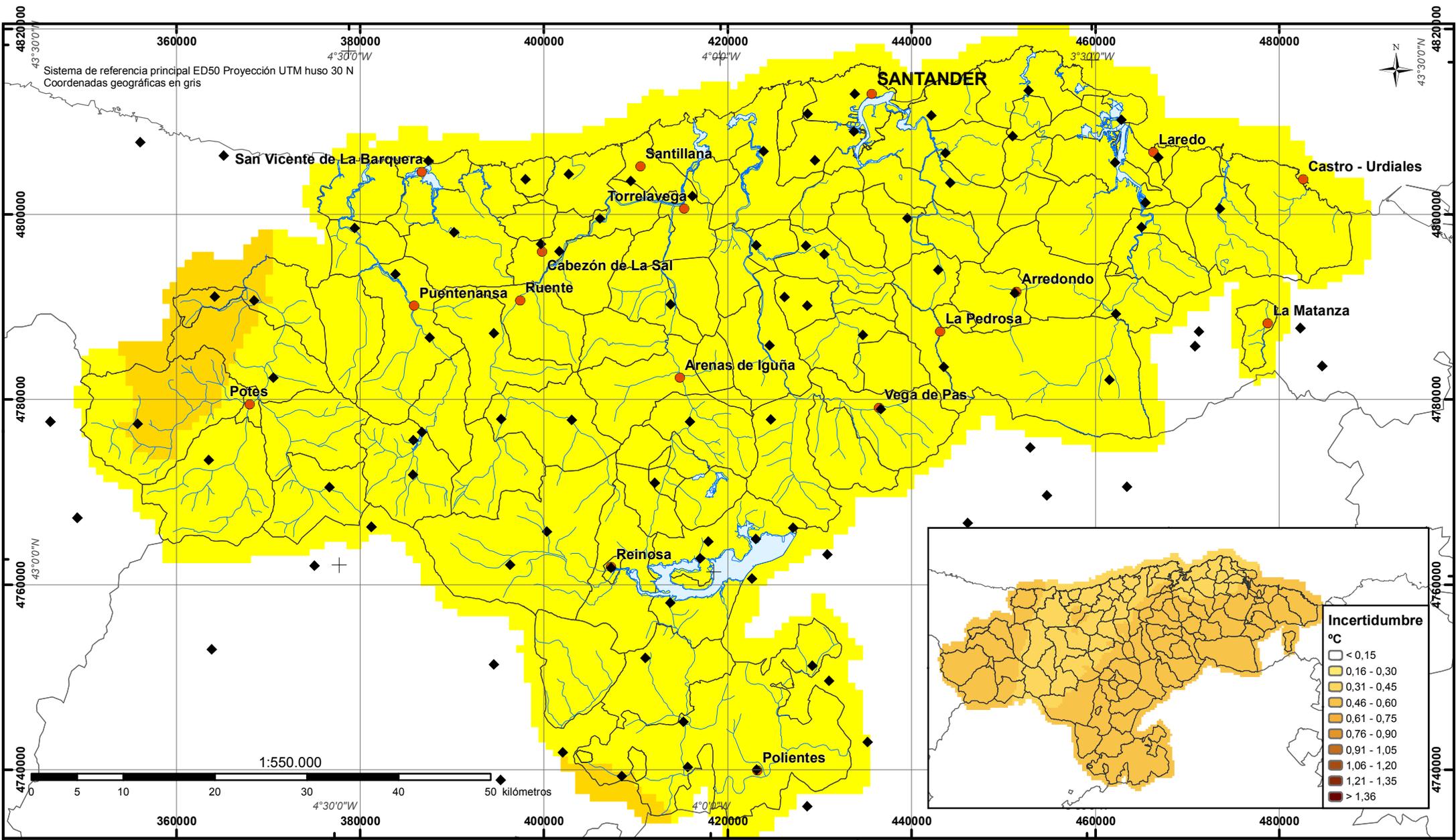
Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria

MAPA 3.2.6. TEMPERATURA MÍNIMA MEDIA. ANUAL. 2040 - 2070. VARIACIÓN CON 1973-2003



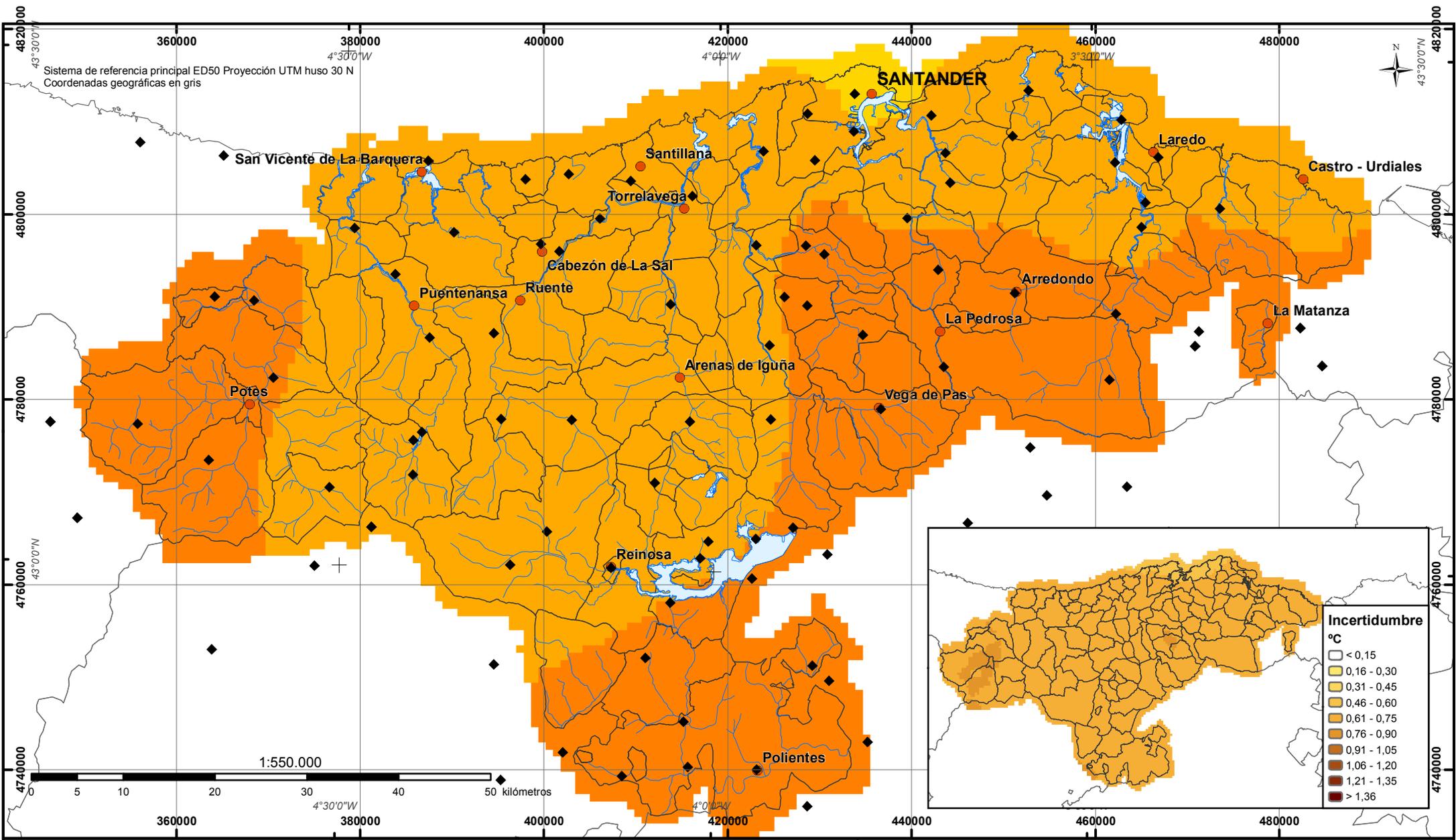
Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria

MAPA 3.2.07. TEMPERATURA MÍNIMA MEDIA. INVIERNO. 2040 - 2070. VARIACIÓN CON 1973-2003



Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria

MAPA 3.2.10. TEMPERATURA MÍNIMA MEDIA. OTOÑO. 2040 - 2070. VARIACIÓN CON 1973-2003



UC
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

CSIC

GOBIERNO de CANTABRIA
CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE

IFA
Instituto de Física de Cantabria

Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria

MAPA 3.2.11. TEMPERATURA MÍNIMA MEDIA. ANUAL. 2070 - 2100. VARIACIÓN CON 1973-2003

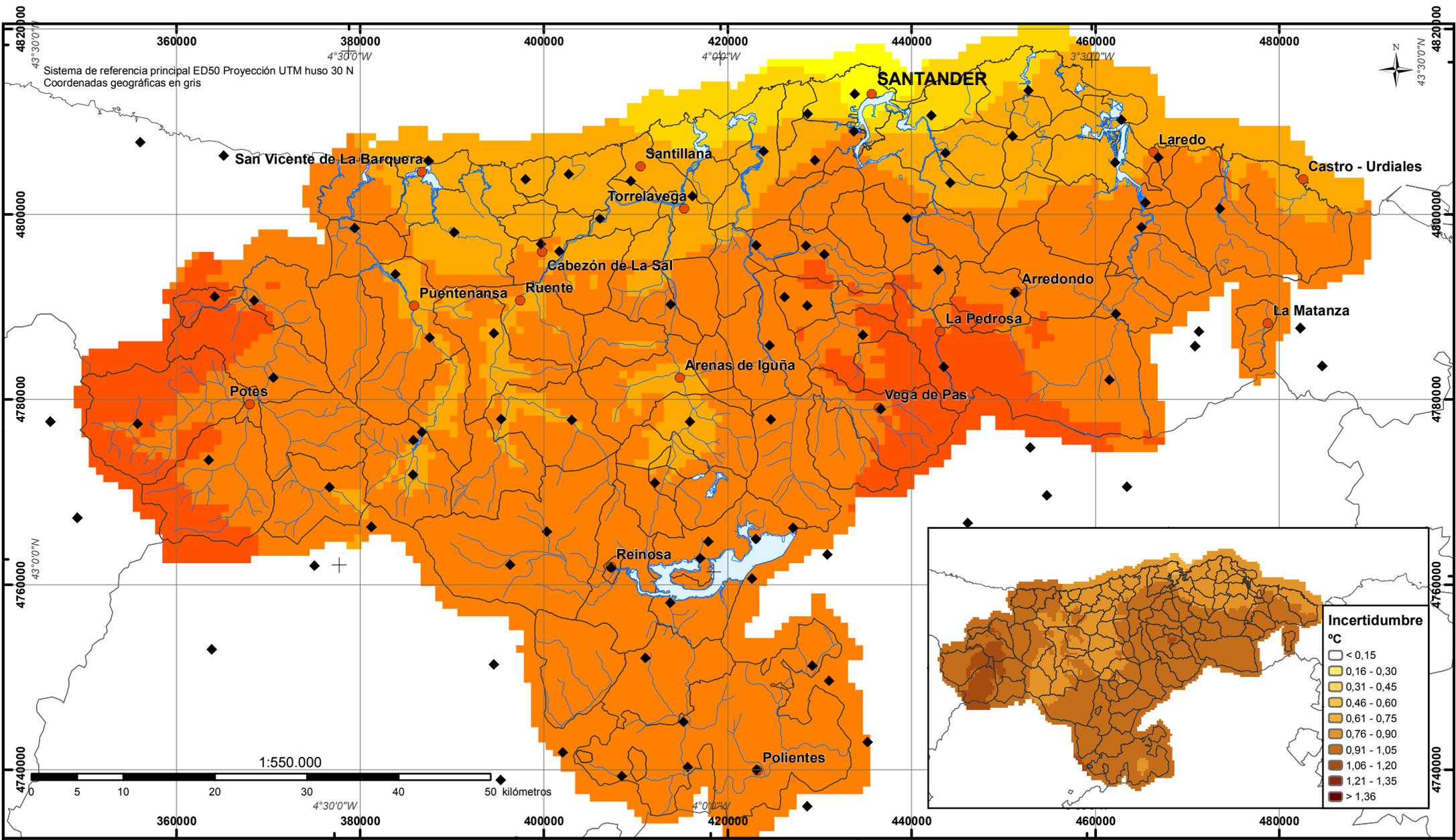
Leyenda

- Ríos
- Municipios
- Núcleos de población
- Estaciones meteorológicas

°C

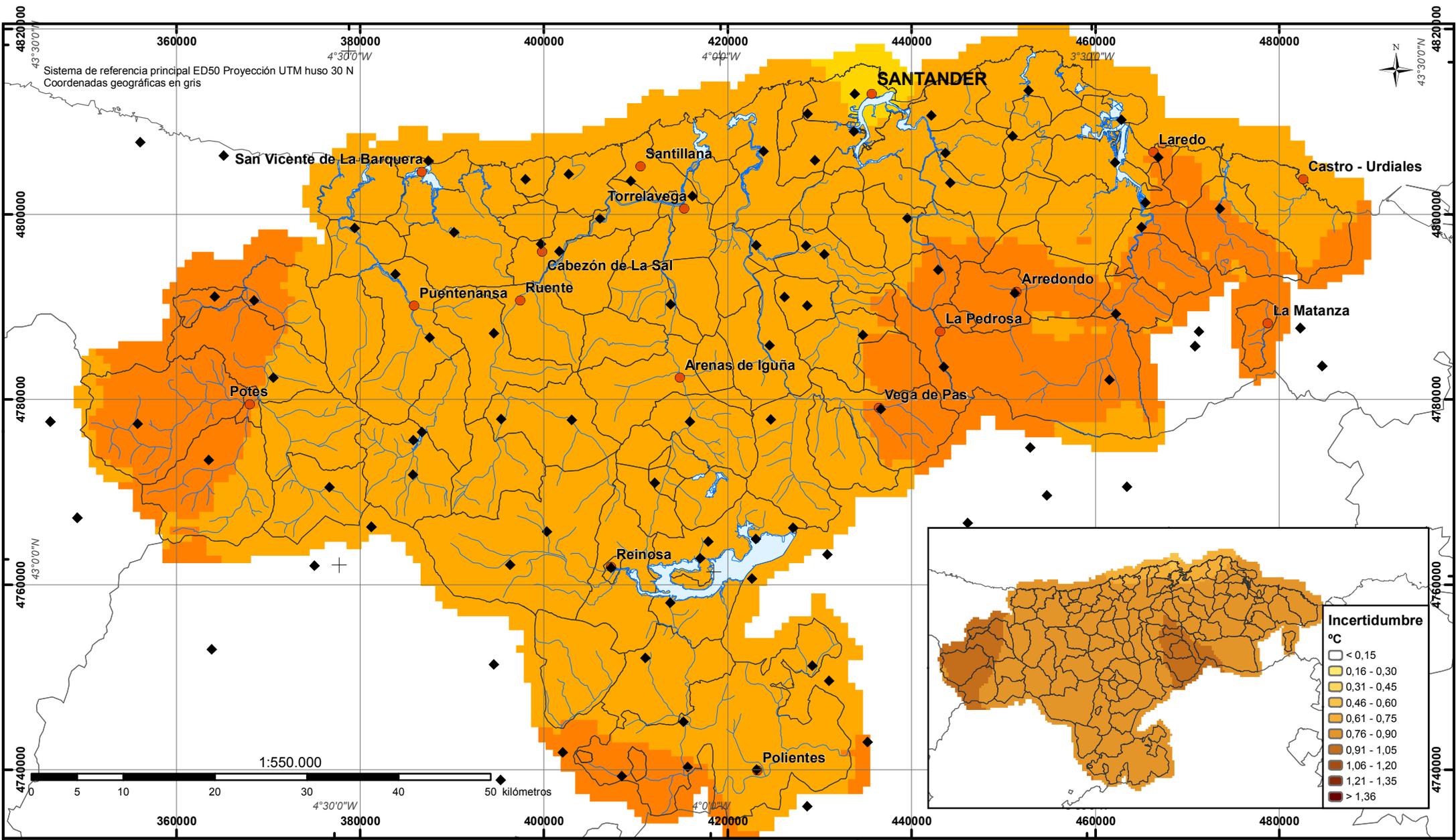
- < 0,5
- 0,6 - 1,0
- 1,1 - 1,5
- 1,6 - 2,0
- 2,1 - 2,5
- 2,6 - 3,0
- 3,1 - 3,5
- 3,6 - 4,0
- 4,1 - 4,5
- 4,6 - 5,0
- 5,1 - 5,5
- > 6,0

Elaborado por SIG Rural S.L. www.sigrural.com



Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria

MAPA 3.2.14. TEMPERATURA MÍNIMA MEDIA. VERANO. 2070 - 2100. VARIACIÓN CON 1973-2003



Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria

MAPA 3.2.15. TEMPERATURA MÍNIMA MEDIA. OTOÑO. 2070 - 2100. VARIACIÓN CON 1973-2003